



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



GUILHERME CAVALLARI BUENO

**APLICAÇÃO DA ESTATÍSTICA À MODELAGEM
HIDROLÓGICA E À PREVISÃO DE USO E OCUPAÇÃO DO
SOLO PARA O DESENVOLVIMENTO DE NOVAS
MÉTRICAS DE DESEMPENHO**

Uberlândia, (2023)

GUILHERME CAVALLARI BUENO

**APLICAÇÃO DA ESTATÍSTICA À MODELAGEM
HIDROLÓGICA E À PREVISÃO DE USO E OCUPAÇÃO DO
SOLO PARA O DESENVOLVIMENTO DE NOVAS
MÉTRICAS DE DESEMPENHO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eugênio Pereira

Coorientador: Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho

Uberlândia, (2023)

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

B928 Bueno, Guilherme Cavallari, 1998-
2023 APLICAÇÃO DA ESTATÍSTICA À MODELAGEM HIDROLÓGICA E À
PREVISÃO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO PARA O
DESENVOLVIMENTO DE NOVAS MÉTRICAS DE DESEMPENHO [recurso
eletrônico] / Guilherme Cavallari Bueno. - 2023.

Orientador: Carlos Eugênio Pereira.

Coorientador: José Eduardo Alamy Filho.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.563>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. Pereira, Carlos Eugênio, 1974-
(Orient.). II. Alamy Filho, José Eduardo, 1976-
(Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia.
Pós-graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 298, PPGEC				
Data:	11 de setembro de 2023	Hora de início:	9:30 h	Hora de encerramento:	13:15h
Matrícula do Discente:	12112ECV023				
Nome do Discente:	Guilherme Cavallari Bueno				
Título do Trabalho:	Integração de modelagem hidrológica, análise de uso do solo e estatísticas para desenvolvimento técnico e gestão de recursos hídricos na bacia do Rio Grande				
Área de concentração:	Análise Espacial, Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental				
Linha de pesquisa:	Recursos Hídricos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Medida e equacionamento do transporte de sedimentos gerados em canal de laboratório e em rios da UPGRH-PN				

Reuniu-se, em sessão pública por webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Dirceu Silveira Reis Junior - UnB, Hugo de Oliveira Fagundes - UNICAMP e Carlos Eugênio Pereira, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Carlos Eugênio Pereira, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Eugênio Pereira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 11/09/2023, às 15:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Dirceu Silveira Reis Junior, Usuário Externo**, em 11/09/2023, às 15:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Hugo de Oliveira Fagundes, Usuário Externo**, em 11/09/2023, às 17:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_externo=0, informando o código verificador **4797316** e o código CRC **2FD5ED6A**.

Dedico a meus pais, Joana e Mauro, este trabalho.

*Tento, nesta dedicatória,
manifestar honestamente
meu carinho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, Joana e Mauro, a compreensão e todo o apoio oferecidos a mim durante esta jornada. Grato também sou a meu orientador, Carlos Eugênio Pereira, bem como a meu coorientador, José Eduardo Alamy Filho, pelos ensinamentos a mim passados. Não com menor importância, recordo-me de agradecer à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) a oportunidade, a meus amigos Samuel Dutra e Caroline Timóteo pela amizade ao longo desta caminhada, além dos professores Fernando Fan, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que tanto colaborou para o desenvolvimento desta pesquisa, e Márcio Ricardo Salla, da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), responsável pelo fornecimento dos dados hidrológicos advindos da Universidade Politécnica de Valência (UPV), que tanto foram úteis para este trabalho.

RESUMO

A aplicação de elementos estatísticos à hidrologia é recorrente, sendo muito comum o emprego de testes estatísticos ou de análises de tendência a séries temporais de dados hidrológicos, como por exemplo as vazões. Contudo, existe na literatura alguma carência da aplicação da estatística direcionada para o desenvolvimento de métricas de eficiência a serem utilizadas na avaliação de simulações hidrológicas, o que gera uma demanda por funções que possam complementar aquelas já existentes, como o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH), o coeficiente de Nash-Sutcliffe com logaritmos (NASHLOG) e o percentual de viés (PBIAS).

Portanto, esta pesquisa esteve imbuída não apenas no desenvolvimento de novas métricas, mas também na construção de uma função objetivo composta a partir das métricas desenvolvidas. De início, as métricas desenvolvidas foram testadas separadamente em simulações de vazão não calibradas feitas através do Modelo de Grandes Bacias (MGB) para a Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG), representando o período de 01/01/1990 a 29/06/2015. Em seguida, a composição da função objetivo foi elaborada, e a função resultante foi aplicada à calibração do modelo *Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning* (HBV) para dados aleatórios de precipitação, evapotranspiração e vazão disponibilizados pela Universidade Politécnica de Valência (UPV) para o período de abril de 1996 a setembro de 2004.

A testagem individual com o MGB revelou que as métricas desenvolvidas foram capazes de demonstrar satisfatoriamente os seguintes fatores: a posição do erro de cálculo da vazão de 90% de permanência em relação à média dos erros determinados para todas as vazões do hidrograma; a tendência de subestimativa ou superestimativa da simulação, com base nas áreas dos hidrogramas calculados e observados e também nos percentuais de subestimativa, superestimativa e acerto; a compatibilidade entre os comprimentos dos hidrogramas calculados e observados; a compatibilidade entre os traçados desses hidrogramas.

Concomitantemente, a aplicação da composição de métricas como função objetivo revelou que a calibração do modelo HBV tendeu a reduzir consideravelmente as variações de pico e de depressão das vazões. Foram realizadas calibrações comparativas, utilizando como funções objetivo NASH, NASHLOG e PBIAS, tendo sido ainda analisadas as condições de dispersão

dos dados de vazões observadas e calculadas sem calibração pelo HBV. Retas de tendência foram plotadas para todos os hidrogramas produzidos, e os valores de R^2 foram determinados para tais retas, vindo-se a obter 0,65 no caso da calibração feita com a composição de métricas, 0,23 para a calibração com NASHLOG, 0,17 para a calibração com NASH, 0,13 para a calibração com PBIAS, 0,10 para os dados calculados pelo HBV sem calibração e 0,06 para os dados observados. De modo notável, o efeito do uso da composição como função objetivo foi muito distinto do uso das demais métricas de eficiência.

Na pesquisa foram ainda executadas outras aplicações da estatística. As médias móveis simples (MMS), ponderada (MMP) e exponencial (MME) foram utilizadas para a execução de estimativas de vazão na BHRG para o período de 30/06/2015 a 29/06/2016. Cadeias de Markov foram aplicadas para que se obtivessem as chances de ocorrência das estimativas. Nenhuma das médias móveis foi considerada satisfatória a partir da comparação entre os hidrogramas calculados e os hidrogramas observados, embora a verificação matemática por tendência de viés tenha apontado para resultados razoavelmente confiáveis gerados com MME.

Utilizaram-se ainda os testes estatísticos de Mann-Kendall, Pettit e *t* de *student*, respectivamente para avaliar a presença de tendências, pontos de ruptura no comportamento e diferenças entre as médias de vazão na primeira e na segunda metades do período analisado (01/01/1990 a 29/06/2015). Nenhum dos testes permitiu a conclusão de que houve tendências ou alterações significativas no regime de vazões da BHRG durante esse período. Ainda foi elaborada uma análise diante de parâmetros estatísticos básicos, no caso, quartis, média e desvio padrão, o que também não levou a nenhuma constatação de tendências prevalentes.

Finalmente, foram confeccionados no QGIS mapas de uso e ocupação do solo em 3 regiões da BHRG, para os anos de 1995, 2005 e 2015, com o uso de imagens *Landsat*. No programa TerrSet, foram obtidas previsões de uso do solo para 2025 e 2035 em duas regiões da bacia. Constatou-se com isso a tendência de prevalência da atividade agropecuária no solo da BHRG, especialmente nas regiões de menor declividade.

Palavras-chave: Bacia Hidrográfica do Rio Grande - Simulações - Estimativas de vazão - Cadeias de Markov - Testes estatísticos

ABSTRACT

The application of statistical elements to hydrology is recurrent, and it is very common to use statistical tests or trend analyses on time series of hydrological data, such as flows. However, there is a lack in the literature of the application of statistics to the development of efficiency metrics to be used in the evaluation of hydrological simulations, which generates a demand for functions that can complement those that already exist, such as the Nash-Sutcliffe coefficient (NASH), the Nash-Sutcliffe coefficient with logarithms (NASHLOG) and the percentage of bias (PBIAS).

Therefore, this research was involved not only in the development of new metrics, but also in the construction of a composite objective function based on the metrics developed. Initially, the metrics developed were tested separately in uncalibrated flow simulations made using the Large Basin Model (MGB) for the Rio Grande River Basin (BHRG), representing the period from 01/01/1990 to 29/06/2015. Next, the composition of the objective function was elaborated, and the resulting function was applied to the calibration of the *Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning* (HBV) model for random precipitation, evapotranspiration and flow data provided by the Polytechnic University of Valencia (UPV) for the period from April 1996 to September 2004.

Individual testing with the MGB revealed that the metrics developed were able to satisfactorily demonstrate the following factors: the position of the 90% permanence flow calculation error in relation to the average of the errors determined for all the flows in the hydrograph; the tendency to underestimate or overestimate the simulation, based on the areas of the calculated and observed hydrographs and also on the percentages of underestimation, overestimation and success; the compatibility between the lengths of the calculated and observed hydrographs; the compatibility between the paths of these hydrographs.

At the same time, the application of the composition of metrics as an objective function revealed that the calibration of the HBV model tended to considerably reduce the peak and trough variations in flows. Comparative calibrations were carried out using NASH, NASHLOG and PBIAS as objective functions, and the dispersion conditions of the observed and calculated flow data without HBV calibration were also analyzed. Trend lines were

plotted for all the hydrographs produced, and R2 values were determined for these lines, obtaining 0.65 in the case of the calibration made with the composition of metrics, 0.23 for the calibration with NASHLOG, 0.17 for the calibration with NASH, 0.13 for the calibration with PBIAS, 0.10 for the data calculated by HBV without calibration and 0.06 for the observed data. Remarkably, the effect of using composition as an objective function was very different from using the other efficiency metrics.

Other applications of statistics were also carried out in the research. Simple moving averages (SMA), power moving averages (PMA) and exponential moving averages (EMA) were used to perform flow estimates in the BHRG for the period from June 30, 2015 to June 29, 2016. Markov chains were applied to obtain the chances of the estimates occurring. None of the moving averages were considered satisfactory when comparing the calculated hydrographs with the observed hydrographs, although the mathematical check for bias pointed to reasonably reliable results generated with EMA.

The Mann-Kendall, Pettit and Student's t statistical tests were also used, respectively, to assess the presence of trends, breakpoints in behavior and differences between the flow averages in the first and second halves of the period analyzed (01/01/1990 to 29/06/2015). None of the tests led to the conclusion that there were significant trends or changes in the BHRG's flow regime during this period. An analysis was also carried out using basic statistical parameters, in this case quartiles, mean and standard deviation, which also did not lead to any finding of prevalent trends.

Finally, land use and occupation maps were created in QGIS for three regions of the BHRG, for the years 1995, 2005 and 2015, using Landsat images. In the TerrSet program, land use forecasts were obtained for 2025 and 2035 in two regions of the basin. This showed a tendency for farming to prevail on the BHRG's land, especially in the regions with the lowest slopes.

Keywords: Rio Grande River Basin - Simulations - Flow estimates - Markov chains - Statistical tests

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	Projeções (a) horizontal e (b) vertical sobre uma linha de tendência, sendo mostradas as distâncias d_i e d_j entre retas paralelas, respectivamente para as projeções horizontal e vertical.....	55
Figura 2-	(a) Elipse com destaque para o foco, o semi-eixo maior, o semi-eixo menor e a distância do centro ao foco; (b) rotação de um plano sobre o eixo que contém o diâmetro da circunferência de um cilindro de base circular.....	56
Figura 3-	Secções planares no cilindro em função do ângulo θ	57
Figura 4-	Elipses representativas de formatos de bacias hidrográficas fictícias (A e B) inseridas como pontos na curva da função $\sec\theta$ para o intervalo $0^\circ < \theta < 90^\circ$	58
Figura 5-	Esquema de probabilidades em uma cadeia de Markov.....	79
Figura 6-	(a) Percentuais do processo produtivo e (b) matriz de transição consequente.....	80
Figura 7-	Zonas de aceitação e de rejeição na curva de distribuição.....	89
Figura 8-	Delimitação da bacia do Rio Grande com rios explicitados.....	91
Figura 9-	Relevo da bacia do Rio Grande com (a) declividades e (b) elevação.....	94
Figura 10-	Uso e ocupação do solo na bacia do Rio Grande.....	95
Figura 11-	Fluxograma da etapa de pré-processamento no IPH- <i>Hydro Tools</i>	96
Figura 12-	Fluxograma da etapa de processamento no MGB-IPH.....	100
Figura 13-	Postos fluviométricos selecionados.....	102
Figura 14-	Fluxograma da etapa de calibração e validação do modelo.....	105
Figura 15-	Regiões delimitadas para os mapas de uso e ocupação do solo na bacia do Rio Grande.....	138
Figura 16-	Áreas (a) leste e (b) oeste da bacia do Rio Grande para as quais foram feitas análises de uso e ocupação do solo.....	140
Figura 17-	Mapas de uso e ocupação do solo para a região 1 em (a) 1995, (b) 2005 e (c) 2015.....	169
Figura 18-	Mapas de uso e ocupação do solo para a região 2 em (a) 1995, (b) 2005 e (c) 2015.....	170
Figura 19-	Mapas de uso e ocupação do solo para a região 3 em (a) 1995, (b) 2005 e	

	(c) 2015.....	171
Figura 20-	Mapas de uso e ocupação do solo para a área leste em (a) 1995, (b) 2015 e (c) 2020.....	173
Figura 21-	Mapa de mudanças verificadas na área leste entre 1995 e 2015.....	174
Figura 22-	Área leste: (a) Projeção para o ano de 2020, (b) mapa real do ano de 2020, (c) mapa de validação e (d) detalhe do mapa de validação.....	175
Figura 23-	Área leste: (a) Projeções para os anos de 2025 e (b) 2035.....	176
Figura 24-	Mapas de uso e ocupação do solo para a área oeste em (a) 1995, (b) 2015 e (c) 2020.....	177
Figura 25-	Mapa de mudanças verificadas na área oeste entre 1995 e 2015.....	178
Figura 26-	Área oeste: (a) Projeção para o ano de 2020, (b) mapa real do ano de 2020, (c) mapa de validação e (d) detalhe do mapa de validação.....	179
Figura 27-	Área oeste: (a) Projeção para os anos de 2025 e (b) 2035.....	180
Figura 28-	Área leste: (a) Mapa de elevação e (b) mapa de declividade.....	181
Figura 29-	Área oeste: (a) mapa de elevação e (b) mapa de declividade.....	181

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1-	(a) Gráfico original dos reatores e (b) destaque das áreas e (c) linhas de comprimento para 1 célula de mistura completa comparada ao reator de fluxo em pistão.....	60
Gráfico 2-	(a) Gráfico original dos reatores e (b) destaque das áreas e (c) linhas de comprimento para 1 célula de mistura completa comparada ao reator de fluxo em pistão.....	62
Gráfico 3-	Variação da temperatura e da precipitação ao longo de ano no clima A_w	92
Gráfico 4-	Variações de X_l e X_{lr} perante $\Delta Q_{90}(\%)$ entre as estações fluviométricas.....	143
Gráfico 5-	Variações de X_2 perante os dados percentuais de subestimativa, superestimativa e igualdade entre as estações fluviométricas.....	144
Gráfico 6-	Variações de X_3 entre as estações fluviométricas.....	144
Gráfico 7-	Variações de X_4 entre as estações fluviométricas.....	145
Gráfico 8-	Variações de X_5 perante $\Delta Q_{90}(\%)$ entre as estações fluviométricas..	145
Gráfico 9-	Hidrograma e reta de tendência para as vazões observadas.....	147
Gráfico 10-	Hidrograma e reta de tendência para as vazões simuladas sem calibração.....	147
Gráfico 11-	Hidrograma e reta de tendência para as vazões simuladas com calibração através do coeficiente de Nash-Sutcliffe.....	148
Gráfico 12-	Hidrograma e reta de tendência para as vazões simuladas com calibração através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para logaritmos.....	148
Gráfico 13-	Hidrograma e reta de tendência para as vazões simuladas com calibração através do módulo do percentual de viés.....	149
Gráfico 14-	Hidrograma e reta de tendência para as vazões simuladas com calibração através do módulo da função F_c	149
Gráfico 15-	Porcentagem de dias com previsões confiáveis feitas MMS, MMP e MME perante a tendência de viés no posto ID 3161.....	151
Gráfico 16-	Porcentagem de dias com previsões confiáveis feitas MMS, MMP e MME perante a tendência de viés no posto ID 3167.....	151

Gráfico 17-	Porcentagem de dias com previsões confiáveis feitas MMS, MMP e MME perante a tendência de viés no posto ID 3182.....	152
Gráfico 18-	Porcentagem de dias com previsões confiáveis feitas MMS, MMP e MME perante a tendência de viés no posto ID 2562.....	152
Gráfico 19-	Porcentagem de acerto de MMS, MMP e MME para a tendência de viés no posto ID 3161.....	153
Gráfico 20-	Porcentagem de acerto de MMS, MMP e MME para a tendência de viés no posto ID 3167.....	154
Gráfico 21-	Porcentagem de acerto de MMS, MMP e MME para a tendência de viés no posto ID 3182.....	154
Gráfico 22-	Porcentagem de acerto de MMS, MMP e MME para a tendência de viés no posto ID 2562.....	155
Gráfico 23-	Simulações de previsão por média móvel para o posto (a) ID 3161 e (b) ID 3167, com MME.....	156
Gráfico 24-	Simulações de previsão por média móvel para o posto (a) ID 3182 e (b) ID 2562, com MME.....	157
Gráfico 25-	(a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 29/09 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3161.....	159
Gráfico 26-	(a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 29/12 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3161.....	160
Gráfico 27-	(a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 30/03 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3161.....	161
Gráfico 28-	Porcentagens de ocorrência das estimativas com MME para as estações (a) ID 3161 e (b) ID 3167.....	163
Gráfico 29-	Porcentagens de ocorrência das estimativas com MME para as estações (a) ID 3182 e (b) ID 2562.....	164
Gráfico 30-	Comparação dos hidrogramas simulados e observados para os postos (a) 61760080 e (b) 61796080.....	203
Gráfico 31-	Comparação dos hidrogramas simulados e observados para os postos (a) 61941080 e (b) 61998080.....	204
Gráfico 32-	Detalhes da comparação dos hidrogramas simulados e observados para	

	os postos (a) 61760080 e (b) 61796080.....	205
Gráfico 33-	Detalhes da comparação dos hidrogramas simulados e observados para os postos (a) 61941080 e (b) 61998080.....	206
Gráfico 34-	Comparação das curvas de permanência simuladas e observadas para os postos (a) 61760080 e (b) 61796080.....	207
Gráfico 35-	Comparação das curvas de permanência simuladas e observadas para os postos (a) 61941080 e (b) 61998080.....	208
Gráfico 36-	Hidrogramas simulados para os postos (a) 61760080 e (b) 61796080.....	209
Gráfico 37-	Hidrogramas simulados para os postos (a) 61941080 e (b) 61998080.....	210
Gráfico 38-	Curvas de permanência simuladas para os postos (a) 61760080 e (b) 61796080.....	211
Gráfico 39-	Curvas de permanência simuladas para os postos (a) 61941080 e (b) 61998080.....	212
Gráfico 40-	Séries temporais do nível de água simuladas para os postos (a) 61760080, (b) 61796080.....	213
Gráfico 41-	Séries temporais do nível de água simuladas para os postos (a) 61941080 e (b) 61998080.....	214
Gráfico 42-	Série temporal das áreas inundadas.....	215
Gráfico 43-	Posição do módulo da diferença para a vazão Q_{90} em relação à média e ao intervalo do desvio padrão.....	216
Gráfico 44-	<i>Boxplot</i> dos módulos das diferenças.....	216
Gráfico 45-	Posição do módulo da diferença relativa para a vazão Q_{90} em relação à média e ao intervalo do desvio padrão.....	218
Gráfico 46-	Posição do módulo da diferença relativa para a vazão Q_{90} em relação à mediana e aos quartis 25% e 75%.....	218
Gráfico 47-	Posição da razão das derivadas estimadas para a vazão Q_{90} em relação à média e ao intervalo do desvio padrão.....	220
Gráfico 48-	Posição da razão das derivadas estimadas para a vazão Q_{90} em relação à mediana e aos quartis 25% e 75%.....	220
Gráfico 49-	Simulações de previsão por média móvel para o posto ID 3161: (a) MMS e (b) MMP.....	223
Gráfico 50-	Simulações de previsão por média móvel para o posto ID 3167: (a)	

	MMS e (b) MMP.....	224
Gráfico 51-	Simulações de previsão por média móvel para o posto ID 3182: (a) MMS e (b) MMP.....	225
Gráfico 52-	Simulações de previsão por média móvel para o posto ID 2562: (a) MMS e (b) MMP.....	226
Gráfico 53-	(a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 29/09 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3167.....	227
Gráfico 54-	(a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 29/12 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3167.....	228
Gráfico 55-	(a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 30/03 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3167.....	229
Gráfico 56-	(a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 29/09 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3182.....	230
Gráfico 57-	(a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 29/12 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3182.....	231
Gráfico 58-	(a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 30/03 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3182.....	232
Gráfico 59-	(a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 29/09 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 2562.....	233
Gráfico 60-	(a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 29/12 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 2562.....	234
Gráfico 61-	(a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 30/03 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 2562.....	235
Gráfico 62-	Resultados dos testes estatísticos para (a) ID 3161 e (b) ID 3167.....	237

Gráfico 63- Resultados dos testes estatísticos para (a) ID 3182 e (b) ID 2562.....238

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Resultados de desempenho para os modelos aplicados à bacia do Rio Paranaíba.....	44
Tabela 2-	Resultados de desempenho para os modelos aplicados à bacia do Rio Paraná.....	44
Tabela 3-	Intervalos dos coeficientes NASH e NASHLOG e seus significados para modelos avaliados.....	53
Tabela 4-	Intervalos do módulo do percentual de viés (PBIAS) e seus significados para modelos avaliados.....	53
Tabela 5-	Faixas de valores típicos para os parâmetros calibráveis do modelo HBV.....	76
Tabela 6-	Códigos numéricos do mapa de URHs e seus significados.....	99
Tabela 7-	Variação das vazões para a data de 30/06 no posto ID 3161.....	133
Tabela 8-	Percentuais de observação dos pares para o caso exemplificado.....	134
Tabela 9-	Resultados de métricas tradicionais para os 4 postos.....	142
Tabela 10-	Valores de R^2 para os hidrogramas.....	150
Tabela 11-	Dados percentuais obtidos a partir dos testes estatísticos.....	165
Tabela 12-	Dados percentuais acumulados para os referenciais estatísticos.....	166
Tabela 13-	Dados percentuais por faixa para os referenciais estatísticos.....	167

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Modelos aplicados aos respectivos trechos das bacias hidrográficas.....42

LISTA DE SÍMBOLOS

- MAPE - Índice que avalia quanto as previsões se desviam percentualmente e relação aos valores observados
- MAD - Índice que identifica os desvios das previsões (em m^3/s) em relação aos dados observados
- X - Fração saturada da área
- W - Volume de água armazenada no solo (mm)
- D_{sup} - Lâmina de escoamento superficial da URH em um intervalo de tempo (mm/dia)
- Δt - Intervalo de tempo (dia)
- P - Precipitação no solo da URH (mm/dia)
- A - Termo limite passível de ser calculado
- D_{int} - Lâmina de escoamento subsuperficial da URH em um intervalo de tempo (mm/dia)
- W_z - Limite mínimo de armazenamento no solo da URH j , para que ocorra o escoamento subsuperficial, sendo na maioria dos casos utilizado, para início de calibração, como 0,10, 10% de W_m (mm)
- λ - Índice de porosidade do solo da URH, usualmente dado como 0,67
- D_{bas} - Fluxo de água do solo da URH da minibacia para o aquífero em um intervalo de tempo (mm/dia)
- D_{cap} - Fluxo ascendente no solo da URH da minibacia no intervalo de um dia (mm/dia)
- DM_{cap} - Máximo fluxo ascendente no solo da URH (mm/dia)
- Q_{sup} - Vazão de saída do reservatório linear superficial da minibacia i (m^3/s)
- TKS_i - Tempo de retardo do reservatório superficial da minibacia i (s)
- $V_{sup_i}^{k-\frac{1}{2}}$ - Volume de água presente no reservatório superficial e na metade do intervalo de tempo na minibacia i (m^3)
- T_c - Estimativa do tempo de concentração da minibacia (s)
- Q_{int} - Vazão de saída do reservatório linear subsuperficial da minibacia (m^3/s)
- TKI - Tempo de retardo do reservatório subsuperficial da minibacia (s)
- $V_{int_i}^{k-\frac{1}{2}}$ - Volume de água presente no reservatório subsuperficial e na metade do intervalo de tempo na minibacia i (m^3)
- Q_{bas} - Vazão de saída do reservatório linear subterrâneo da minibacia (m^3/s)
- TKB - Tempo de retardo do reservatório subterrâneo da minibacia (s)

$V_{bas_i}^{k-\frac{1}{2}}$	- Volume de água presente no reservatório subterrâneo e na metade do intervalo de tempo na minicacia (m^3)
Q	- Vazão total gerada na minibacia (m^3/s)
$P_{ef,t}$	- Precipitação efetiva no intervalo t (mm)
H_{t-1}	- Umidade do solo no início do intervalo t (mm)
$H_{máx}$	- Umidade máxima possível de ser acumulada (mm)
$P_{l,t}$	- Precipitação líquida no intervalo t (mm)
β	- Coeficiente de forma
H_t	- Umidade do solo no tempo t (mm)
$EV_{r,t}$	- Evapotranspiração real no intervalo t (mm)
$Ev_{p,t}$	- Evapotranspiração potencial no intervalo t (mm)
PWP	- Ponto limite constante relativo ao solo (mm)
$Q_{0,t}$	- Vazão superficial ($hm^3/mês$)
K_0	- Constante de escoamento superficial (dia^{-1})
S_{t-1}	- Lâmina líquida no reservatório superior no início do intervalo t (mm)
$L_{máx}$	- Lâmina limite para que comece a ocorrer o escoamento superficial (mm)
A	- Área da bacia hidrográfica (km^2)
$Q_{1,t}$	- Vazão subsuperficial ($hm^3/mês$)
K_1	- Constante de escoamento subsuperficial (dia^{-1})
$Q_{2,t}$	- Vazão subterrânea ($hm^3/mês$)
K_2	- Constante de escoamento subterrâneo (dia^{-1})
S_{t-1}	- Lâmina líquida no reservatório inferior no início do intervalo t (mm)
$Q_{p,t}$	- Vazão de percolação ($hm^3/mês$)
K_p	- Constante de percolação (dia^{-1})
S_t	- Lâmina líquida no reservatório superior no tempo t (mm)
I_t	- Lâmina líquida no reservatório inferior no tempo t (mm)
$Q_{t,t}$	- Vazão total ($hm^3/mês$)
A_w	- Tipo climático encontrado na bacia do Rio Grande
NASH	- Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe
NASHLOG	- Coeficiente de Nash-Sutcliffe aplicado aos logaritmos
PBIAS	- Percentual de viés
$\Delta V(\%)$	- Erro percentual de volume
$\Delta Q_{90}(\%)$	- Erro percentual no cálculo da vazão Q_{90}

Q_{90}	- Vazão de 90% de permanência
Q_{s90}	- Vazão de 90% de permanência calculada
Q_{m90}	- Vazão de 90% de permanência observada
W_m	- Armazenamento de água no solo (mm)
b	- Parâmetro da relação de armazenamento e saturação de água no solo
K_{int}	- Parâmetro de drenagem superficial (mm/dia)
K_{bas}	- Parâmetro de escoamento subterrâneo (mm/dia)
λ	- Dado que controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou da superfície do solo (XL na interface)
CAP	- Dado controlador do fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial ao longo do tempo (mm/dia)
W_c	- Parâmetro de limite máximo de armazenamento residual (mm)
C_s	- Parâmetro para a calibração da propagação superficial nas células (s)
C_i	- Parâmetro para a calibração da propagação subsuperficial nas células (s)
C_b	- Parâmetro de atraso do reservatório subterrâneo (h)
Q_b	- Condição inicial para o modelo, que não reflete necessariamente a condição de um parâmetro $m^3/(s \cdot km^2)$
Q_m	- Vazão medida na estação (m^3/s)
Q_s	- Vazão simulada (m^3/s)
n	- Número de intervalos de tempo entre medições de vazão
$\overline{Q_m}$	- Média das vazões medidas (m^3/s)
W	- Largura do canal
a	- Coeficiente da equação
A	- Área de drenagem
b	- Expoente da equação
D	- Profundidade do canal
c	- Coeficiente da equação
d	- Expoente da equação
LN	- Símbolo para logaritmo neperiano
y	- Variável dependente, do eixo das ordenadas
u	- Termo independente, ou coeficiente linear da reta
v	- Coeficiente angular da reta
x	- Variável da qual depende y e que é multiplicada por v
e	- Número de Euler

- u_w - Coeficiente linear para a curva de largura do canal em função da área de drenagem
- v_w - Coeficiente angular para a curva de largura do canal em função da área de drenagem
- u_d - Coeficiente linear para a curva de profundidade do canal em função da área de drenagem
- v_d - Coeficiente angular para a curva de profundidade do canal em função da área de drenagem
- X_l - Percentual de divergência entre o módulo da diferença absoluta encontrada para a vazão Q_{90} e a média dos módulos das diferenças absolutas para as vazões do hidrograma (%)
- Q_{si} - Vazão simulada no ponto i (m^3/s)
- Q_{mi} - Vazão medida no ponto i (m^3/s)
- N - Quantidade de vazões utilizadas na análise
- X_{lr} - Percentual de divergência entre o módulo da diferença relativa encontrada para a vazão Q_{90} e a média dos módulos das diferenças relativas para as vazões do hidrograma (%)
- X_2 - Coeficiente de comparação de áreas
- Q_{si-1} e Q_{si} - Duas vazões consecutivas simuladas (m^3/s)
- Q_{mi-1} e Q_{mi} - Duas vazões consecutivas medidas (m^3/s)
- t_{i-1} e t_i - Duas medidas consecutivas de tempo a que correspondem as vazões consecutivas (dia)
- X_3 - Coeficiente de comparação de comprimentos
- Q_{si-1} - Vazão anterior a Q_{si} (m^3/s)
- Q_{si+1} - Vazão posterior a Q_{si} (m^3/s)
- Q_{mi-1} - Vazão anterior a Q_{mi} (m^3/s)
- Q_{mi+1} - Vazão posterior a Q_{mi} (m^3/s)
- Q_{s1} - Vazão simulada do ponto inicial (m^3/s)
- Q_{s2} - Vazão posterior a Q_{s1} (m^3/s)
- Q_{m1} - Vazão medida do ponto inicial (m^3/s)
- Q_{m2} - Vazão posterior a Q_{m1} (m^3/s)
- Q_{sN} - Vazão simulada do ponto final (m^3/s)
- Q_{sN-1} - Vazão anterior a Q_{sN} (m^3/s)
- Q_{mN} - Vazão medida do ponto final (m^3/s)
- Q_{mN-1} - Vazão anterior a Q_{mN} (m^3/s)

- X_4 - Coeficiente das derivadas estimadas
- X_5 - Diferença percentual entre as razões de derivadas estimadas para a vazão Q_{90} e a média das razões (%)
- Q_{s90+1} - Vazão simulada seguinte à vazão de permanência de 90% simulada (m^3/s)
- Q_{s90-1} - Vazão simulada anterior à vazão de permanência de 90% simulada (m^3/s)
- Q_{m90+1} - Vazão medida seguinte à vazão de permanência de 90% medida (m^3/s)
- Q_{m90-1} - Vazão medida anterior à vazão de permanência de 90% medida (m^3/s)
- k - Semiperímetro do triângulo retângulo formado pela distância do centro ao foco da elipse, por seu semi-eixo maior e por seu semi-eixo menor (u.c.)
- a - Semi-eixo maior da elipse (u.c.)
- b - Semi-eixo menor da elipse (u.c.)
- c - Distância entre o centro e o foco da elipse (u.c.)
- j - Segundo parâmetro, também determinado em função das medidas dos lados do triângulo retângulo (u.c.)
- α_2 - Maior ângulo de inclinação de uma das retas tangentes à função secante (graus)
- α_1 - Menor ângulo de inclinação de uma das retas tangentes à função secante (graus)
- ε - Diferença entre α_2 e α_1 (graus)
- ε'' - Valor alterado de ε após a projeção horizontal (graus)
- k' - Valor alterado de k após a projeção vertical (u.c.)
- $f(x)$ - Função da linha de tendência calculada para as elipses de aproximação
- $f'(x)$ - Derivada de 1ª ordem da função da linha de tendência calculada para as elipses de aproximação
- d_i - Distância entre a reta tangente à linha de tendência em no ponto projetado horizontalmente e sua paralela passante pelo ponto original
- d_j - Distância entre a reta tangente à linha de tendência em no ponto projetado verticalmente e sua paralela passante pelo ponto original
- d_c - Distância resultante, igual à média geométrica de d_i e d_j
- μ_l - Maior valor entre $f'(\varepsilon'')*\varepsilon''-k$ e $f'(\varepsilon'')*\varepsilon-k$
- μ_m - Menor valor entre $f'(\varepsilon'')*\varepsilon''-k$ e $f'(\varepsilon'')*\varepsilon-k$
- μ_n - Maior valor entre $f'(\varepsilon)*\varepsilon-k$ e $f'(\varepsilon)*\varepsilon-k'$
- μ_o - Menor valor entre $f'(\varepsilon)*\varepsilon-k$ e $f'(\varepsilon)*\varepsilon-k'$
- R_l - Coeficiente relativo às áreas gráficas dos gráficos de decaimento da concentração de matéria orgânica em tratamentos de esgotos ($0 \leq R_1 \leq 1$)

C_0	- Concentração inicial de matéria orgânica (mg/L)
K	- Constante de reação da substância no reator para 1ª ordem (dia^{-1})
t	- Tempo de detenção total para todos os pistões considerados (dias)
N	- Número de células consideradas para o tratamento
t_i	- Tempo de detenção da célula i (dias)
C_{i-1}	- Concentração de matéria orgânica anterior à entrada do reator ao qual se refere o tempo de detenção t_i , ou a concentração inicial, caso este seja o primeiro e/ou o único reator (mg/L) (dias)
R_2	- Coeficiente relativo aos comprimentos gráficos ($0 \leq R_2 \leq 1$)
C_i	- Concentração de matéria orgânica após a passagem do afluente pelo reator i (mg/L)
D	- Número de intervalos de discretização adotados, recomendando-se $D \geq 1000$, t_{i-1} o tempo transcorrido dentro do reator de fluxo em pistão medido no instante em que o efluente deixaria o reator de mistura completa $i-1$ (dias)
t_{ii}	- Tempo transcorrido dentro do reator de fluxo em pistão medido no instante em que o efluente deixaria o reator de mistura completa i (dias)
R	- Coeficiente médio de R_1 e R_2 ($0 \leq R \leq 1$)
F_{ts}	- Valor previsto no período vindouro através da média móvel simples
n	- Número de dados constantes no período escolhido
A_{t-i}	- Dados observados nos períodos adotados para a média móvel
F_{tp}	- Valor previsto no período vindouro através da média móvel ponderada
P_{t-i}	- Valor fracionário do peso do dado observado A_{t-i}
F_{te}	- Valor previsto no período vindouro através da média móvel com suavização exponencial simples
α	- Constante de suavização ($0 \leq \alpha \leq 1$)
A_{t-1}	- Dado observado imediatamente anterior ao dado previsto
E_i	- Erro simples de previsão cometido no período i
A_i	- Dado observado no período i
F_{ii}	- Previsão no período i
EA_i	- Erro absoluto cometido no período i
DMA_n	- Desvio médio absoluto no período n
TS_n	- Tendência de viés do período n
S	- Somatório dos signos ($\text{sgn}(x)$) das diferenças específicas entre os dados da série
n	- Número de dados da série

- sgn* - Signo do número
- x_j e x_k - Dados da série
- $E[S_i]$ - Média de S
- $Var[S]$ - Variância de S
- p - Número de grupos de valores iguais na série
- t_j - Número de valores iguais contidos no grupo j
- Z - Estatística de S , de forma que H_0 deve ser aceita somente se $|Z| \leq Z_{\frac{\alpha}{2}}$, para $F_N\left(Z_{\frac{\alpha}{2}}\right) = \frac{\alpha}{2}$, estando F_N como a distribuição normal cumulativa e α como o nível de significância adotado no teste
- $U_{t,T}$ - Estatística aquela calculada para o dado fixado t (tal que $t=2, \dots, T$)
- $U_{t-1,T}$ - Estatística aquela calculada para o dado fixado $t-1$ (antecessor de t)
- T - Número de sequências de diferenças entre um dado fixado (imutável) e um dado alterável (mutável)
- Y_t e Y_j - Dados da série
- p - Significância do teste de Pettit
- S_{ant} - Coeficiente angular da reta passante pelo ponto $i-1$ e pelo ponto i
- y_i - Coordenada y do ponto i
- y_{i-1} - Coordenada y do ponto $i-1$
- S_{suc} - Coeficiente angular da reta passante pelo ponto i e pelo ponto $i+1$
- y_{i+1} - Coordenada y do ponto $i+1$
- D_{esti} - Derivada estimada no ponto i
- D_{est1} - Derivada estimada no primeiro ponto
- y_2 - Coordenada y no ponto 2
- y_1 - Coordenada y no ponto inicial
- D_{estN} - Derivada estimada no último ponto
- Y_N - Coordenada y no ponto final
- Y_{N-1} - Coordenada y no ponto anterior ao final
- w_0 - Variável a que deve tender h para o ponto inicial
- w_f - Variável a que deve tender h para o ponto final
- h - Passo temporal (dias)
- w_i - Variável a que deve tender h para os pontos internos
- lim - Limite
- $f(x); g(x)$ - Funções

$f'(x); g'(x)$	- Derivadas de 1ª ordem das funções $f(x)$ e $g(x)$, respectivamente
M_i	- Módulo da diferença entre a vazão simulada (calculada) e a vazão medida (observada) para a data i (m^3/s)
M_{90}	- Módulo determinado para a vazão Q_{90} (m^3/s)
\bar{M}	- Sendo \bar{M} a média de todos os módulos de diferenças do conjunto (m^3/s)
N	- Número de vazões calculadas e observadas na média dos módulos
M_{r90}	- Módulo relativo determinado para a vazão Q_{90} (m^3/s)
Int	- Integral numérica
n	- Número de pontos considerados no cálculo da integral numérica
A_s	- Área abaixo do hidrograma de vazões simuladas (u.a.)
t_{i+1}	- Tempo transcorrido na data seguinte à data i , desde a primeira data (dias)
t_i	- Tempo transcorrido na data i , desde a primeira data (dias)
A_m	- Área abaixo do hidrograma de vazões medidas (u.a.)
$NSUB$	- Número de vezes em que o modelo subestime as vazões
N	- Número total de vazões do hidrograma
$NSUP$	- Número de vezes em que o modelo superestime as vazões
NIG	- Número de vezes em que o modelo acerte perfeitamente as simulações com as vazões observadas
$PSUB$	- Percentual de subestimativa (%)
$PSUP$	- Percentual de superestimativa (%)
PIG	- Percentual de igualdade (%)
D_{pi-1}	- Distância entre dois pontos consecutivos (u.c.)
D_{si-1}	- Distância entre dois pontos consecutivos no hidrograma de vazões simuladas (u.c.)
D_{mi-1}	- Distância entre dois pontos consecutivos no hidrograma de vazões medidas (u.c.)
L_s	- Comprimento do hidrograma de vazões simuladas (u.c.)
L_m	- Comprimento do hidrograma de vazões medidas (u.c.)
$D_{est,si}$	- Derivada estimada no ponto i do hidrograma de vazões simuladas
$D_{est,mi}$	- Derivada estimada no ponto i do hidrograma de vazões medidas
$D_{est,s1}$	- Derivada estimada no primeiro ponto do hidrograma de vazões simuladas
$D_{est,m1}$	- Derivada estimada no primeiro ponto do hidrograma de vazões medidas
$D_{est,sN}$	- Derivada estimada no último ponto do hidrograma de vazões simuladas
$D_{est,mN}$	- Derivada estimada no último ponto do hidrograma de vazões medidas
R_{di}	- Razão das derivadas estimadas para a data i
R_{d1}	- Razão das derivadas estimadas para a primeira data

R_{dN}	- Razão das derivadas estimadas para a última data
$\overline{R_d}$	- Média aritmética das razões de derivadas estimadas
N_d	- Número de razões calculáveis
$Q(t_i)$	- Vazão na posição i (m^3/s)
k	- Coeficiente angular da reta de regressão linear
t_i	- Tempo na posição i (dias)
$Q(2)$	- Vazão na segunda data (m^3/s)
$Q(1)$	- Vazão na primeira data (m^3/s)
$Q(3)$	- Vazão faltante a ser estimada por regressão linear
P_i	- Peso da vazão na posição i
n_i	- Número da posição i
T	- Número total de vazões consideradas na determinação dos pesos
F_c	- Função objetivo formada pela composição das métricas

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BHRG	- Bacia hidrográfica do Rio Grande
UPG	- Unidade de Planejamento e Gestão
IPH	- Instituto de Pesquisas Hidráulicas
UFRGS	- Universidade Federal do Rio Grande do Sul
MAPE	- Índice que avalia quanto as previsões se desviam percentualmente e relação aos valores observados
MAD	- Índice que identifica os desvios das previsões (em m ³ /s) em relação aos dados observados
URH	- Unidade de resposta hidrológica
MLP	- <i>Multi-Layer Perceptron</i>
PUC-Rio	- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
UFF	- Universidade Federal Fluminense
UFRJ	- Universidade Federal do Rio de Janeiro
LATEC/PR	- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
MEL	- Modelo Estatístico Multivariado
UHE	- Usina hidrelétrica
IPT	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MGB	- Modelo de Grandes Bacias
ETA	- Modelo de previsão de precipitações
CPTEC	- Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
SIG	- Sistemas de Informação Geográfica
GIS	- <i>Geographic Information Systems</i>
ANA	- Agência Nacional de Águas
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
RC	- Curvas de classificação
HGE	- Hidrologia de Grande Escala
INEGI	- <i>Instituto Nacional de Estadística y Geografía</i>
HRC	- Hydrologic Response Class
SRC	- Sistema de Referência de Coordenadas
USGS	- <i>United States Geological Survey</i>
TRMM	- <i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>

BRNN	- Modelo baseado em Redes Neurais
RLM	- Modelo de Regressão Linear Múltipla
GSA	- Global Sensitivity Analysis
HBV	- <i>Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning</i>
SPAEF	- <i>Spatial Efficiency</i>
KGE	- Coeficiente de eficiência de Klin-Gupta
RMSE	- <i>Root Mean Square Error</i>
MAE	- <i>Mean Absolute Error</i>
AIC	- <i>Akaike's Information Criterion</i>
ARIL	- <i>Average Relative Interval Length</i>
POC	- <i>Percentage of Coverage</i>
NUE	- <i>Normalized Uncertainty Efficiency</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	33
1.1	OBJETIVOS.....	36
1.1.1	<i>Objetivo geral.....</i>	36
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	36
1.2	JUSTIFICATIVA.....	36
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	38
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	38
2.1	MODELAGEM HIDROLÓGICA	38
2.1.1	<i>Modelo MGB</i>	39
2.1.2	<i>Modelo HBV.....</i>	51
2.2	MÉTRICAS DE DESEMPENHO DO MGB	52
2.3	BASES PARA NOVAS MÉTRICAS DE DESEMPENHO	54
2.3.1	<i>Conceitos aplicados no desenvolvimento de novas métricas.....</i>	54
2.3.2	<i>Análise e composição de métricas na literatura.....</i>	66
2.4	EQUACIONAMENTO DA CALIBRAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS 67	
2.4.1	<i>Equacionamento do modelo MGB.....</i>	67
2.4.2	<i>Equacionamento do modelo HBV.....</i>	73
2.5	MAPEAMENTO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	76
2.6	PROCESSOS ESTOCÁSTICOS	77
2.6.1	<i>Cadeias de Markov.....</i>	78
2.6.2	<i>Modelagem de uso e ocupação do solo com cadeias de Markov</i>	80
2.7	MÉDIA MÓVEL.....	81
2.8	ANÁLISE DE TENDÊNCIA.....	84
3	ÁREA DE ESTUDO	90
3.1	DADOS BÁSICOS DA BACIA DO RIO GRANDE.....	90
3.2	CLIMA DA BACIA DO RIO GRANDE	92
3.3	BIOMAS DA BACIA DO RIO GRANDE.....	92
3.4	RELEVO DA BACIA DO RIO GRANDE.....	93
3.5	SOLOS DA BACIA DO RIO GRANDE.....	94
3.6	USO DO SOLO NA BACIA DO RIO GRANDE	95
4	MÉTODOS	96
4.1	PRÉ-PROCESSAMENTO NO IPH- <i>HYDRO TOOLS</i>	96

4.2	PROCESSAMENTO NO MGB-IPH.....	99
4.2.1	<i>Dados hidrológicos empregados</i>	101
4.2.2	<i>Definição dos parâmetros de solo</i>	103
4.3	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO.....	104
4.4	PROPOSTAS DE MÉTRICAS DE DESEMPENHO	108
4.4.1	<i>Estimativa de derivadas.....</i>	108
4.4.2	<i>Estimativa de derivadas no MGB.....</i>	115
4.4.3	<i>Explicação das métricas.....</i>	116
4.4.4	<i>Composição de métricas.....</i>	129
4.5	CALIBRAÇÃO DO MODELO HBV COM A COMPOSIÇÃO DE MÉTRICAS 129	
4.6	ESTIMATIVAS DE VAZÕES COM MÉDIAS MÓVEIS	130
4.7	ANÁLISE PROBABILÍSTICA DAS ESTIMATIVAS	133
4.8	ANÁLISE DE TENDÊNCIA NAS SÉRIES DE VAZÕES	135
4.9	ANÁLISE DAS SÉRIES TEMPORAIS DE VAZÃO MEDIANTE PARÂMETROS ESTATÍSTICOS.....	136
4.10	ELABORAÇÃO DE MAPAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	137
4.11	PREVISÃO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO TERRSET	139
5	RESULTADOS.....	142
5.1	RESULTADOS PRELIMINARES E MÉTRICAS DE DESEMPENHO.....	142
5.1.1	<i>Resultados preliminares</i>	142
5.1.2	<i>Análise segundo as métricas de desempenho</i>	142
5.2	HIDROGRAMAS GERADOS COM O MODELO HBV.....	147
5.3	ESCOLHA DA ESTIMATIVA DE VAZÕES COM MÉDIAS MÓVEIS	150
5.4	CÁLCULO DE PROBABILIDADES COM CADEIAS DE MARKOV PARA AS ESTIMATIVAS DA MÉDIA MÓVEL ESCOLHIDA.....	162
5.5	RESULTADOS DOS TESTES ESTATÍSTICOS PARA AS SÉRIES TEMPORAIS DE VAZÃO POR DATAS	165
5.6	RESULTADOS PARA PARÂMETROS ESTATÍSTICOS.....	166
5.7	MAPAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA DO RIO GRANDE	168
5.8	PREVISÕES DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	172
5.9	MAPAS DE ELEVAÇÃO E DE DECLIVIDADE	180
6	CONCLUSÃO	182
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	185

ANEXO A – PROCEDIMENTO PADRÃO DE EXTRAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CANAL NO PRÉ-PROCESSAMENTO	200
APÊNDICE A – RESULTADOS ADICIONAIS DA SIMULAÇÃO NÃO CALIBRADA DO MGB.....	203
APÊNDICE B – ANÁLISES ADICIONAIS DOS RESULTADOS DAS MÉTRICAS DE DESEMPENHO.....	216
APÊNDICE C – RESULTADOS E ANÁLISES COMPLEMENTARES DAS ESTIMATIVAS DE VAZÕES POR MÉDIAS MÓVEIS	223
APÊNDICE D – DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DOS TESTES ESTATÍSTICOS.....	237

1 INTRODUÇÃO

Apesar do desenvolvimento observável em métodos de modelagem estatística e matemática, ainda persiste no cenário da modelagem hidrológica uma demanda não atendida por melhoramentos nas formas de se avaliarem resultados de simulações hidrológicas (ONYUTHA, 2021; ALEXANDER; TROPSHA; WINKLER, 2015).

Ademais, do ponto de vista estatístico, é desejável que métricas possam se complementar entre si, haja vista que todas as métricas estatísticas são influenciáveis por certos elementos do conjunto analisado de dados, de maneira que pode haver falhas em seus indicativos, sendo interessante que diferentes perspectivas estatísticas sejam abordadas em um processo de determinação da qualidade de uma simulação (BECKER, 2015).

Um exemplo claro dessa condição são os coeficientes de Nash-Sutcliffe e de Kling-Gupta, que contêm uma incerteza amostral bastante destacável, o que se dá devido ao fato de a distribuição de probabilidade dos erros ao quadrado entre os dados calculados e os dados observados poderem possuir amplitudes consideráveis, de forma que poucos dados possam influenciar fortemente ambas as métricas (CLARK *et al.*, 2021; NEWMAN *et al.*, 2015; LAMONTAGNE; BARBER; VOGEL, 2020).

Vale destacar que a calibração é uma etapa extremamente relevante da modelagem hidrológica, pois os usuários de modelos hidrológicos tendem a buscar a máxima precisão possível em termos de propriedades hidrológicas específicas, selecionando assim métricas que correspondam aos requisitos da aplicação a ser feita, tornando passível de ser aceita, caso necessário, uma menor habilidade do modelo em aspectos menos determinantes para o trabalho realizado (MIZUKAMI *et al.*, 2019; ELSNER *et al.*, 2010; 2014).

Portanto, de posse do exposto, nota-se que a aplicação da estatística de modo a produzir algum desenvolvimento nos métodos de análise de simulações hidrológicas é algo necessário para a modelagem hidrológica.

Esse tipo de modelagem pode ser utilizado em muitas áreas de estudos de recursos hídricos, sendo útil para a previsão de dados de vazão em rios e reservatórios, bem como para o

preenchimento desses mesmos dados (NASCIMENTO, 2021). Um modelo hidrológico é uma ferramenta útil para a execução de simulações de processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica, permeando a análise de previsão de consequências de diferentes ocorrências de valores observados (NASCIMENTO, 2021; TUCCI, 2001).

A modelagem hidrológica se utiliza de formulações matemáticas e físicas (modelos) do fluxo de água e seus componentes acerca de uma determinada superfície ou subsuperfície terrestre, atuando então como a caracterização de recursos e sistemas hidrológicos através de modelos físicos de pequena escala, passíveis de serem matemática e computacionalmente executados objetivando a produção de simulações (ALLABY, 2008; FONTES, 2022).

Dentre os modelos hidrológicos mais utilizados, podem ser citados: o Modelo de Grandes Bacias (MGB), desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que possui alta complexidade, sendo um modelo chuva-vazão distribuído e que está diretamente relacionado aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (COLLISCHONN, 2001); o *Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning* (HBV), um modelo chuva-vazão concentrado e de aplicação relativamente simples (CLAESSON; MOLAVI, 2020; MEDINA; MUÑOZ, 2020).

No âmbito da modelagem hidrológica, além do desenvolvimento de métricas de desempenho, a estatística é um campo de aplicação relevante para análises de regimes de vazões e para previsões de vazão. Exemplos disso são: o teste de tendência de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975); o teste de Pettit para pontos de ruptura (PETTIT, 1979); o teste t de *student* para comparação de médias (FEIJOO, 2010); as médias móveis para análises de tendência e previsões (JACOBS; CHASE, 2012; PEINADO; GRAEML, 2007); os processos estocásticos denominados cadeias de Markov, úteis na análise probabilística (TANAKA; STÁBILE, 2020). Tais ferramentas permitem a análise de fatores como possíveis alterações significativas no regime de vazões de uma bacia ao longo do tempo e previsões do comportamento futuro desse regime.

Além da modelagem hidrológica, a modelagem de uso e ocupação do solo é de grande aplicabilidade para o estudo dos recursos hídricos, haja vista que o processo de identificação e classificação do uso do solo é fundamental para o conhecimento do ambiente, bem como para o desenvolvimento de técnicas voltadas à obtenção e à manutenção de tais informações

(VAEZA, 2010). Segundo Nunes e Roig (2015), o planejamento integrado de uso e ocupação do solo é de grande importância especialmente em bacias hidrográficas com recursos naturais relevantes e/ou com histórico de ocupação irregular.

Nesse cenário, o *software* TerrSet é um dispositivo muito utilizado no mapeamento de uso e ocupação do solo, bem como na previsão da ocupação, sendo capaz de realizar estimativas de longo prazo com o uso de cadeias de Markov (BORGES, 2020; EASTMAN, 2020).

Logo, a aplicação estatística via programação computacional, nesta pesquisa, não se limita ao desenvolvimento de métricas de eficiência para a verificação de simulações hidrológicas, mas também serve à elaboração de análises e previsões tanto das condições hidrológicas, quanto de uso e ocupação do solo.

Finalmente, valem ser abordadas algumas características da bacia hidrográfica do Rio Grande (BHRG), utilizada como área de estudo na presente pesquisa: a BHRG possui destaque no cenário brasileiro. Localizada na divisa entre os estados de Minas Gerais e São Paulo, a bacia abriga cerca de 400 municípios, de acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2008), além do fato de a população na área da bacia estar em crescimento, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023). Ademais, a BHRG está situada em uma região economicamente ativa do país (NASCIMENTO; NEVES, 2014; IBGE, 2010; DINIZ, 1993). Essas condições a tornam muito sujeita às atividades antrópicas, o que traz um grande interesse para o estudo de seus fenômenos hidrológicos, especialmente em termos do regime de vazão e do uso do solo.

De posse do exposto, torna-se notável o interesse de que sejam estatisticamente desenvolvidas novas métricas de eficiência para a modelagem hidrológica, bem como de que seja feita uma investigação do regime de vazões e da ocupação do solo na bacia do Rio Grande, através não apenas da modelagem hidrológica e do mapeamento do uso do solo, mas também da testagem estatística e de previsões com análises probabilísticas, tanto em relação ao regime de vazões, quanto em relação ao uso e à ocupação do solo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 *Objetivo geral*

Este trabalho se propõe a desenvolver uma composição de métricas de eficiência e a testá-la como uma função objetivo na calibração de uma simulação hidrológica, bem como a utilizar testes estatísticos, como os testes de Mann-Kendall, de Pettit e t de *student* para analisar o regime de vazões na bacia do Rio Grande, avaliando ainda a influência da ocupação do solo no regime de vazões da mesma bacia.

1.1.2 *Objetivos específicos*

Os objetivos específicos deste trabalho estão elencados nos itens a seguir:

- Desenvolver matematicamente e estatisticamente métricas de eficiência que complementem as métricas já correntemente utilizadas em simulações hidrológicas, bem como executar a aplicação das métricas desenvolvidas em simulações do modelo MGB, vindo em seguida a elaborar uma composição dessas métricas, de forma que tal composição seja aplicada à calibração de uma simulação feita com o modelo HBV;
- Utilizar os seguintes dispositivos estatísticos para executar análises de tendência sobre o regime de vazões da bacia do Rio Grande, bem como para executar previsões de vazão: análise de médias móveis via tendência de viés, cadeias de Markov como elemento probabilístico das previsões e testes estatísticos de Mann-Kendall, de Pettit e t de *student* para análise de possíveis alterações temporais no regime de vazões;
- Executar análises e previsões de uso e ocupação do solo na bacia do Rio Grande, evidenciando as influências dessa ocupação no comportamento do regime de vazões verificado.

1.2 JUSTIFICATIVA

Partindo do ponto de vista estatístico, a presente pesquisa se dispõe a responder aos seguintes questionamentos: “Quais são os efeitos gerados na calibração de simulações hidrológicas ao se utilizar como função objetivo uma composição de métricas de eficiência que contemplem

aspectos diversificados dessas simulações?” e “O que as previsões de vazão, de uso e ocupação do solo e as análises das séries temporais de vazão correspondentes à bacia do Rio Grande revelarão sobre a bacia?”.

Nesse contexto, a hipótese que norteia este trabalho é a de que a calibração com a função objetivo desenvolvida deve trazer resultados satisfatórios para a calibração da simulação hidrológica, ou que ao menos deva atuar como uma ferramenta importante para a suavização de dados de vazão. Ao mesmo tempo entende-se que as análises e previsões de uso e ocupação do solo devem apontar para uma dominância razoavelmente estável ao longo do tempo da atividade agropecuária na bacia do Rio Grande, e que os testes estatísticos devem verificar um regime de vazões consideravelmente estável na bacia.

Outrossim, justifica-se este trabalho com base nos fatores listados a seguir:

- Do ponto de vista da estatística, é interessante que várias métricas possam se complementar quando da análise de um conjunto de dados, haja vista que cada ferramenta estatística possui suas limitações devido às influências geradas pela variação dos dados (BECKER, 2015), ao mesmo tempo em que são necessários esforços para o desenvolvimento de novas métricas no campo da modelagem hidrológica (ONYUTHA, 2021; ALEXANDER; TROPSHA; WINKLER, 2015);
- Dentro das bacias hidrográficas do território brasileiro, está a BHRG. Essa Unidade de Planejamento e Gestão (UPG) ocupa uma área que engloba parte dos estados de São Paulo e Minas Gerais, abrangendo assim uma região onde há concentração de municípios com certa densidade populacional e que se situa, em grande parte, dentro do polígono industrial brasileiro, que se destaca pela atividade econômica (NASCIMENTO; NEVES, 2014; IBGE, 2010; DINIZ, 1993). Ademais, a BHRG abriga um grande contingente populacional, tendo sido registrados cerca de 8,6 milhões de habitantes em seus limites em 2010 (IPT, 2008). Portanto, essa bacia figura em uma região onde a ação antrópica se faz muito presente, de maneira que alterações no uso do solo possam ser frequentes e causar impactos nos processos hidrológicos da bacia hidrográfica.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é composto por seis capítulos, estando estes ordenados do seguinte modo:

- Capítulo 1- executa a introdução, de forma breve, do tema a ser abordado;
- Capítulo 2- traz uma revisão bibliográfica a respeito dos tópicos cabíveis ao tema;
- Capítulo 3- aborda a área de estudo em questão, ou seja, a bacia do Rio Grande;
- Capítulo 4- descreve a metodologia empregada para o estudo do tema proposto;
- Capítulo 5- carrega os resultados obtidos acompanhados de suas respectivas discussões;
- Capítulo 6- aborda as conclusões a que o trabalho permite chegar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A modelagem hidrológica é largamente utilizada em estudos ambientais e análises de bacias hidrográficas. Dentro desse tipo de modelagem, diversos modelos figuram como ferramentas importantes no cenário acadêmico. Nobre (2023) fez a aplicação do modelo CAWM IV para a simular o aporte de vazões em reservatórios-chave no estado do Ceará, tendo sido escolhido esse modelo em virtude de sua boa performance testada para regiões áridas e semiáridas.

Santos (2023) aferiu a qualidade de diferentes métodos de modelagem hidrológica, a saber Curva Número, Método Racional, Racional Modificado, I Pai Wu e TR-55, aplicados às sub-bacias dos riachos Exú, Cachoeira e Jacu, situados nas regiões do Alto e Médio Pajeú. Os resultados explicitaram que a maior eficiência de um modelo depende de características morfológicas da bacia hidrográfica a que é aplicado o modelo (SANTOS, 2023).

Cruz *et al.* (2018) valeram-se da modelagem hidrológica para efetuarem a testagem dos dados de precipitação obtidos via satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Para tanto, foram empregadas 3 escalas temporais de modelagem (diária, a cada 10 dias e mensal) à bacia do Rio Japarutuba, localizada no estado de Sergipe. Apesar da tendência do TRMM de subestimar os dados de precipitação, a modelagem hidrológica relevou-se aceitável para as escalas de 10 dias e mensal (CRUZ *et al.*, 2018).

Generoso (2021), ao testar diferentes modelos hidrológicos para a simulação de vazões diárias tomando como referência o reservatório da Usina Hidrelétrica de Queimados, localizada na bacia do Rio Preto, concluiu que o modelo baseado em Redes Neurais (BRNN) foi aquele que melhor simulou as vazões em estações próximas ao dito reservatório, e que o modelo de Regressão Linear Múltipla (RLM) foi o mais eficiente para a estação mais distante do mesmo reservatório.

Já Possa (2019) utilizou o modelo MGB, atribuindo-lhe gradativamente complexidade, a fim de conseguir melhorias na representação do sistema bacia-lagoa para a interação entre a interação da Lagoa Mirim sobre a Laguna dos Patos. Para a aferição dos resultados, foram empregadas comparações entre os dados simulados e observados de vazão e nível de água (POSSA, 2019).

2.1.1 Modelo MGB

Em linhas gerais, o MGB é um modelo chuva-vazão distribuído (COLLISCHONN, 2001), que está diretamente relacionado a Sistemas de Informação Geográfica (SIG). No aspecto da precipitação, Ribeiro Neto *et al.* (2008) destacam o conjunto de dados de precipitação como um dos dados de entrada fundamentais do modelo MGB, em seus esforços para avaliar a aplicabilidade do modelo à bacia do Rio Amazonas com distintas fontes de dados de precipitação. Essas são informações que evidenciam a relevância da relação chuva-vazão para as bacias hidrográficas.

Sobre a definição de um modelo concentrado, isso significa que, ao contrário de um modelo concentrado, que não considera a variabilidade espacial das variáveis hidrológicas envolvidas no processo, tomando em termos médios fatores como chuva, evaporação, infiltração, vazões, dentre outros, e tendo o tempo como principal variável em um processo chuva-vazão, por exemplo, o MGB, como um modelo distribuído, permite que a área da bacia seja dividida em unidades de discretização, reconhecendo a distribuição espacial das variáveis e dos parâmetros adotados e permeando a manipulação de dados de pluviometria (ALMEIDA; SERRA, 2017; CLARKE, 1973).

Já no que diz respeito às unidades em que o MGB divide a área das bacias hidrográficas, sabe-se que a versão original do programa representava a variabilidade espacial distribuindo

as características da bacia em células regulares ao longo da extensão da mesma, considerando a heterogeneidade de cada característica no interior das células (COLLISCHONN, 2001).

Contudo, também é conhecido o fato de que as versões mais recentes do modelo discretizam as bacias hidrográficas em minibacias, que por sua vez são unidades irregulares, que conferem um maior respeito à forma das bacias hidrográficas, e são divididas em unidades de resposta hidrológica (URHs), entendidas como áreas de comportamento hidrológico similar, explicado por características físicas relacionadas ao solo e à cobertura vegetal (FAN; COLLISCHONN, 2014; PAZ *et al.*, 2011). Portanto, percebe-se que o MGB é um modelo que passa por um processo de evolução ao longo do tempo, o que contribui para a sua eficiência.

Quanto a essa evolução, Kayser e Collischonn (2013) ainda destacam que o IPH tem desenvolvido produtos que visam à integração de sistemas de apoio à decisão com modelos hidrológicos e SIG, tendo como base o MGB. Logo, o referido modelo, além de dispor de trabalhos que investem em melhorias, está diretamente relacionado a SIG, de maneira que o QGIS seja o *software* em que seu pacote de ferramentas é utilizado como *plug-in*.

Ferreira (2017), afirma sobre o modelo MGB-IPH que neste há dois tipos de parâmetros usados: os fixos e os calibráveis. Segundo a autora, os primeiros estão associados a fatores oriundos da vegetação, ou que não interferem consideravelmente nos resultados, como albedo, índice de área foliar (IAF), resistência superficial e altura da cobertura vegetal. Em suma, os parâmetros fixos se referem a valores que podem ser medidos.

Já os parâmetros calibráveis se alteram a cada aplicação do modelo, para que se obtenha um ajuste satisfatório entre o hidrograma observado e o hidrograma calculado. Ainda de acordo com a mesma autora, dentre tais parâmetros figuram: o armazenamento de água no solo (W_m); o parâmetro da relação de armazenamento e saturação de água no solo (b); o parâmetro de drenagem superficial (K_{int}); o parâmetro de escoamento subterrâneo (K_{bas}); o parâmetro para a calibração da propagação superficial nas células (C_s); o parâmetro para a calibração da propagação subsuperficial nas células (C_i) (FERREIRA, 2017).

Pereira, Kayser e Collischonn (2012) desenvolveram em seu trabalho a investigação da integração do MGB-IPH, como fonte de dados de disponibilidade hídrica, e o SAD-IPH, como sistema de tomada de decisão, dentro do SIG. De acordo com os autores, a qualidade de

tal integração depende da codificação resultante da discretização da bacia em mini-bacias. Portanto, os trechos de rio associados a cada mini-bacia na modelagem do MGB-IPH, bem como as redes de drenagem no SAD-IPH, devem coincidir exatamente em número, em posicionamento e em codificação.

Neste cenário, para além do pré-processamento a partir de MDE da região de estudo, para a aplicação do MGB-IPH, demandam-se dados que representem adequadamente a bacia hidrográfica, tanto do ponto de vista temporal, quanto espacialmente. Desta forma, os dados necessários são: séries temporais de chuva e de vazão, séries de temperatura, pressão, insolação, umidade relativa do ar e velocidade do vento, mapas de uso da terra e de cobertura vegetal, tipos de solo, modelo digital de elevação e cartas topográficas (PEREIRA; KAYSER; COLLISCHONN, 2012).

A calibração pode ser feita através das considerações físicas ou da otimização matemática, sendo em ambos os casos os parâmetros estimados na busca pela melhor concordância possível entre os dados observados e os resultados do modelo (PEREIRA; KAYSER; COLLISCHONN, 2012).

Guilhon, Rocha e Moreira (2007) trataram uma comparação entre diferentes métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidroelétricos, dentre eles o MGB-IPH. Segundo os autores, os métodos comparados respeitam as seguintes definições:

- Modelo *Multi-Layer Perceptron* (MLP): desenvolvido pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), utiliza-se de técnicas de inteligência artificial baseadas em redes neurais artificiais;
- Modelo de Regressão Dinâmica: desenvolvido pela PUC-Rio, vale-se de técnicas estocásticas de regressão dinâmica;
- Modelo *Fuzzy* Recorrente: modelo híbrido composto por técnicas de mineração de dados, com emprego da ferramenta Cubo OLAP e de modelos de inteligência artificial baseados em algoritmos *Fuzzy* Recorrentes, e desenvolvido em conjunto pela Universidade Federal Fluminense (UFF) e pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ);

- Modelo SMAP: modelo físico concentrado e determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão (LOPES, 1999), aplicado pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LATEC/PR);
- Modelo SMAP-MEL: solução com modelo híbrido e que utiliza a combinação entre os modelos SMAP e Estocástico Multivariado (MEL), desenvolvidos pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica da USP;
- Modelo MGB-IPH: Modelo Físico Distribuído complementado com o Modelo Estocástico de Correção da Previsão, este último desenvolvido pela Rhama Consultoria Ambiental Ltda.

Diferentes trechos de bacias hidrográficas distintas foram utilizados no emprego dos métodos em análise comparativa. O Quadro 1, por sua vez, evidencia tais trechos e esclarece quais modelos foram aplicados em cada uma dessas áreas.

Quadro 1- Modelos aplicados aos respectivos trechos das bacias hidrográficas

Bacia - Trecho	Modelo
Bacia do rio Iguaçu	<i>Fuzzy</i> Recorrente
	<i>Multi-Layer Perceptron</i> - MLP
	Físico Concnetrado - SMAP
Paranaíba - Trecho incremental a São Simão	Regressão Dinâmica
	Físico Distribuído - MGB-IPH
Paraná - Trecho incremental a Itaipu	Regressão Dinâmica
	Físico Distribuído - MGB-IPH
	Físico/Estocástico - SMAP-MEL

Fonte: Adaptado de Guilhon, Rocha e Moreira (2007).

Para a comparação entre os diferentes modelos, Pereira, Kayser e Collischonn (2012) aplicaram testes de avaliação do desempenho da previsão de vazões naturais. Tais testes buscam a simulação mais realista possível de um ambiente de utilização do protótipo em tempo real, onde os dados observados na última semana são recebidos e armazenados em uma base adequada, sendo as previsões de precipitação feitas com o modelo ETA, operado pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) (MESINGER *et al.*, 1988; BLACK, 1994; SILVA *et al.*, 2007), realizadas para os próximos 10 dias, também recebidas e armazenadas.

Neste cenário, os modelos de previsão são acionados, gerando uma previsão de vazões diárias para 12 dias à frente, bem como projeções para vazões médias semanais para uma semana à frente. Sendo assim, o período selecionado para a aplicação dos testes foi o intervalo entre janeiro de 2002 a dezembro de 2003, por ser subsequente ao período empregado no treinamento dos modelos, evitando-se falhas por falta de continuidade dos dados, problema que poderia atingir certas metodologias. Nas análises foram utilizados vários índices estatísticos, dos quais quatro mereceram destaque no trabalho e respeitam as seguintes definições, novamente dadas pelos autores da referida pesquisa (PEREIRA; KAYSER; COLLISCHONN, 2012):

- MAPE: índice que avalia quanto as previsões se desviam percentualmente e relação aos valores observados, sendo normalmente grande para locais com vazões pequenas e pequeno para um conjunto de vazões grandes, já que as variações são relativas ao total a ser previsto, de forma que seu valor se verifique menor quanto maior a eficiência do modelo;
- MAD: identifica os desvios das previsões (em m^3/s) em relação aos dados observados, tendendo seu valor a ser maior para locais com maiores vazões e menor para um conjunto com vazões menores, tal que as melhores condições são indicadas pelos valores mais baixos do índice;
- NASH: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, mede a eficiência de se gerarem previsões mais acertadas nas cheias, ou seja, nas épocas em que o aproveitamento detiver vazões notavelmente elevadas, de modo que o valor (do coeficiente), variante entre 0 e 1, aponta um melhor resultado quanto maior se demonstrar;
- NASHLOG: coeficiente de Nash-Sutcliffe aplicado aos logaritmos para se valorizarem menores valores de vazão, isto é, sendo menos sensível a cheias, de maneira que quanto maior o valor, oscilante entre 0 e 1, maior será a eficiência do modelo e, logicamente, melhores serão as previsões feitas.

Na bacia do Rio Paranaíba, para o trecho incremental entre a Usina Hidrelétrica (UHE) Itumbiara e a UHE São Simão, aplicaram-se o MGB-IPH e um modelo estocástico fundamentado em regressão dinâmica, além de haverem sido verificados os resultados do modelo Previvaz, em uso na época pelo setor elétrico (PEREIRA; KAYSER; COLLISCHONN, 2012). Portanto, a Tabela 1 apresenta o comparativo entre os resultados nos

índices estatísticos para os ditos métodos de previsão de vazões utilizados. Na tabela observa-se, pois, que os resultados obtidos pelo MGB-IPH foram os mais vantajosos em todos os índices.

Tabela 1. Resultados de desempenho para os modelos aplicados à bacia do Rio Paranaíba.

Estatística	Previvaz	MGB-IPH	Regressão
MAD	169,84	112,97	131,74
MAPE	16,15	10,82	11,94
NASH	0,759	0,889	0,859
NASHLOG	0,842	0,928	0,902

Fonte: Adaptado de Guilhon, Rocha e Moreira (2007).

Na bacia do Rio Paraná, para o trecho incremental entre as UHE Rosana, UHE Porto Primavera e UHE Itaipu, foram aplicados o modelo conceitual distribuído, MGB-IPH, o modelo físico conceitual/estocástico SMAP-MEL, e um modelo estocástico fundamentado em regressão dinâmica. Logo, a Tabela 2 apresenta o comparativo entre os resultados obtidos pelos modelos utilizados e pelo próprio método já em uso na época no setor elétrico, o Previvaz. Novamente, revelaram-se como os mais vantajosos os resultados do MGB-IPH (PEREIRA; KAYSER; COLLISCHONN, 2012).

Tabela 2. Resultados de desempenho para os modelos aplicados à bacia do Rio Paraná.

Estatística	Previvaz	SMAP-MEL	MGB-IPH	Regressão
MAD	687,48	524,79	458,92	579,30
MAPE	28,37	20,90	19,28	23,43
NASH	0,031	0,382	0,57	0,306
NASHLOG	0,242	0,563	0,666	0,498

Fonte: Adaptado de Guilhon, Rocha e Moreira (2007).

Felix (2015) trabalhou com o MGB-IPH na bacia do Rio Piancó, localizada no semiárido do estado da Paraíba. As mais relevantes conclusões do autor foram as de que, de forma geral, o modelo representou satisfatoriamente o regime de vazão da bacia, revelando um hidrograma de vazão com melhor ajuste para passo de tempo a nível mensal do que a nível diário. Com exceção do NASHLOG (coeficiente de Nash-Sutcliffe aplicado aos logaritmos), que não pôde ser melhorado através do ajuste dos parâmetros calibráveis, as funções objetivo apresentaram comportamento similar ao que já fora demonstrado em demais aplicações do método.

Neste cenário, a parametrização do MGB-IPH conseguiu oferecer uma representação suficiente dos processos físicos e hidrológicos da bacia, ainda que os parâmetros calibráveis tenham sido generalizados, ou seja, estando as unidades de resposta hidrológica (HRUs) de mesmo tipo de solo com valores iguais nos dados calibráveis. Não obstante, os parâmetros fixos influenciaram os processos hidrológicos, de maneira que HRU com vegetação de caatinga apresentasse um comportamento distinto daquela com atividade agrícola, o que já era esperado (FELIX, 2015).

Felix (2015) ainda pondera que a bacia do Rio Piancó é dotada de um eficiente monitoramento de dados, fato que facilitou a execução do estudo, figurando os maiores desafios nas definições dos parâmetros fixos e calibráveis, uma vez que o modelo foi poucas vezes aplicado a bacias situadas em regiões semiáridas. Sobre o escoamento calculado, observou-se que a quantidade de água escoada foi superior em solos onde ocorria o manejo agrícola, e que as HRUs com litossolos geraram mais escoamento superficial. Ao mesmo tempo, os solos com menor capacidade de armazenamento de água (W_m) obtiveram maior destaque no escoamento sub-superficial e de base.

Sendo assim, o modelo não ofereceu resultados satisfatórios para este último tipo de escoamento. Apesar disso, o autor considera que o MGB-IPH demonstrou bom potencial também para modelagens em bacias semiáridas, deixando como recomendação enfática o desenvolvimento de pesquisas para se aprofundar o método de calibração multiobjetiva do modelo, visando-se à aplicação em bacias de rios intermitentes. Ademais, deve-se buscar que a calibração automática encontre o melhor ajuste possível, sem que se perca a atenção aos processos físicos de cada HRU (FELIX, 2015).

Fan e Collischonn (2014) propõem em seu trabalho a potencialização do uso da simulação hidrológica, bem como o aprimoramento da integração entre a modelagem e as tecnologias de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e o desenvolvimento nesse campo de estudo através da integração entre o modelo MGB-IPH e a plataforma MapWindow GIS®.

A referida integração deve ser do tipo acoplamento próximo, ou rígido, já que, após a preparação dos dados de entrada do modelo, este é automaticamente acionado pela interface, por meio de uma transferência interna de dados. O teste da ferramenta foi feito na modelagem da bacia do Rio Ijuí, demonstrando o sucesso da representação do comportamento

hidrológico. A interface MapWindow® atua especialmente em duas fases da sequência de aplicação, de modo a facilitar o procedimento. Tais fases são a preparação dos dados de entrada e a visualização seguida de pós-processamento dos dados de saída (FAN; COLLISCHONN, 2014).

A integração beneficia significativamente a preparação dos dados de entrada perante dois aspectos: ferramentas que guiam o usuário durante o procedimento de preparação dos dados de entrada; visualização espacial dos dados, que permeia uma atividade interativa e uma compreensão razoavelmente fácil do sistema simulado (FAN; COLLISCHONN, 2014).

Ainda segundo os mesmos autores, após a simulação, acessam-se os resultados apresentados como mapas e gráficos através da plataforma SIG, o que torna ainda mais breve visual a compreensão dos resultados, haja vista que os locais de interesse são vistos pelo usuário quando do contato deste com as informações. O sucesso da técnica descrita ressalta a eficácia do modelo MGB-IPH, que revela contribuir para a constituição de interfaces de grande praticidade (FAN; COLLISCHONN, 2014).

Vergasta *et al.* (2021) estabeleceram uma avaliação de desempenho dos modelos regional Eta e o MGB-IPH, forçado com o Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere versão 2.5 (BESM-AO 2.5), através da representação do balanço de água da bacia do Rio Madeira para o então período presente. Ambos os modelos conseguiram, de modo geral, representar os componentes do balanço tanto no aspecto atmosférico, quanto no terrestre.

O modelo regional, entretanto, revelou algumas dificuldades, como a superestimação da intensidade de precipitação nas regiões íngremes, situadas no oeste da bacia. Em contrapartida, o MGB-IPH indicou bons resultados, forçado com o Eta-BESM-OA, especialmente na representação para o ramo terrestre do ciclo anual de vazões, níveis do rio (cota) e áreas de inundação (VERGASTA *et al.*, 2021).

O modelo também foi capaz de simular decentemente um atraso da ordem de 3 meses entre os máximos da área de inundação e a precipitação. A simulação da referida área no período de cheia apresentou um erro relativo de 20%, sendo considerada satisfatória, conforme os próprios autores, apesar de o percentual não ser usualmente considerado como adequado nesse tipo de análise (VERGASTA *et al.*, 2021).

Já na vazante, os erros foram mais significativos, o que não invalida a utilidade dos resultados obtidos, uma vez que o maior interesse na demanda dos recursos dá-se sobre as cheias. No trabalho, é notável que as estações com melhor desempenho se situam em regiões de extensa planície inundável, de solos profundos, onde o MGB representa melhor os processos de armazenamento (em planície de inundação) e efeitos de remanso (VERGASTA *et al.*, 2021).

Dessa forma, os autores concluem que o modelo hidrológico é eficaz na em estudos de variabilidade climática, mudanças no clima e no uso da terra. Bem como para sistemas operacionais de previsão hidrológica na bacia amazônica. Eles advertem que no trabalho publicado foi utilizada somente uma integração numérica climática, enquanto que se recomenda a aplicação de vários membros nas integrações, pois simulações através de técnicas de *ensemble* normalmente possuem melhores desempenhos (VERGASTA *et al.*, 2021).

Oliveira *et al.* (2019) concluem que o modelo MGB-IPH provou ser eficiente para a simulação hidrológica da bacia do alto Rio Teles Pires, porque o fluxo hidrológico foi bem representado para os períodos de calibração e de validação. Os coeficientes NASH e NASLOG foram superiores a 0,75, enquanto que o valor da PBIAS oscilou de -11,4% a 1,9%, comumente levando à superestimação dos fluxos de pico e à subestimação das vazões Q_{90} e Q_{95} , algo que se prefere para o controle e a conservação de recursos hídricos.

Os parâmetros mais sensíveis para a simulação foram a capacidade de umidade do solo e a relação de armazenamento e saturação, que impactaram severamente os valores de mínima e de máxima vazão, bem como o balanço hídrico geral. Segundo os autores, os resultados por eles obtidos esclarecem que o MGB-IPH pode ser utilizado como um modelo auxiliador da gestão de recursos hídricos na bacia do alto Rio Teles Pires e da avaliação de disponibilidade de água a curto prazo, através das curvas de permanência (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

Portanto, nota-se que os valores obtidos pelos autores (NASH e NASHLOG superiores a 0,75 – bons valores; |PBIAS| oscilante entre 1,9% a 11,4% – de bons a ótimos valores) denotam bons resultados do modelo avaliado (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

Siqueira *et al.* (2016) descrevem que muitos testes de comparação entre o MGB-IPH e outras ferramentas envolvidas com pacotes SIG, ou *Geographic Information Systems* (GIS).

Resultados desses testes mostram que o uso do método denominado *Modified Heuristic Search* (MHS), baseado na aproximação heurística tratada por Hou *et al.* (2011) em seu trabalho sobre a extração automática de redes de drenagem em modelos do tipo *Digital Elevation Models* (DEM), leva o *IPH-Hydro Tools* à produção de redes de drenagem com maior qualidade, em comparação com aquelas implementadas no ArcGIS e no Whitebox GAT.

Isso se justifica, pois toma-se menos tempo nas etapas de geração de áreas de captação. O *software* IDRISI®, que também se vale de ferramentas de menor custo para a remoção das regiões de depressão, revelou-se no trabalho dos autores ser similar ao *IPH-Hydro Tools* no que diz respeito à qualidade da drenagem. Todavia, o último demonstrou-se mais vantajoso no processamento de redes mais extensas (SIQUEIRA *et al.*, 2016).

A geração de áreas de captação entre duas confluências de rios no IDRISI® não apresentou um desempenho tão bom quanto o da ferramenta desenvolvida, sendo que essa geração é um procedimento importante para a discretização espacial de modelos hidrológicos, como o MGB-IPH, de acordo com os mesmos autores. Contudo, o *IPH-Hydro Tools* também possui limitações, e uma das de maior destaque é justamente a incompatibilidade com redes muito extensas, um aspecto relevante para modelos do tipo DEM com resoluções espaciais mais altas. Isso se deve ao uso exclusivo da memória interna, e o problema pode ser resolvido com técnicas mais avançadas de operações *Input-Output* I/O (SIQUEIRA *et al.*, 2016).

Ademais, existem algumas deficiências na representação da drenagem sobre grandes áreas planas, sendo que isso se mostra mais provável de ocorrer em reservatórios e em grandes rios. Quanto à estrutura dos métodos implementados no *IPH-Hydro Tools* visando à remoção de depressões e à derivação das direções de escoamento, tende-se a descrever uma drenagem ocorrente mais próxima à margem do rio, e não ao seu eixo, quando se trata de grandes áreas com a mesma elevação (SIQUEIRA *et al.*, 2016).

Collischonn *et al.* (2007) entendem que o MGB-IPH, ao ser usado para testar se associações poderiam ser verificadas entre dados disponíveis e valores de parâmetros do modelo através da análise de bacias pareadas, valendo-se de dados de duas bacias com características similares situadas no sul do Brasil, revelou previsões razoáveis em bacias de vazões não

medidas perante a condição de que os parâmetros dessa bacia pudessem ser adequadamente encaixados em outra bacia semelhante.

O MGB-IPH vem sendo aplicado a muitas análises de bacias hidrográficas com áreas desde 3000 km² até 1000000 km² na América do Sul, e no trabalho destes autores, foi inicialmente empregado no estudo da bacia do Rio Taquari-Antas, havendo sido manualmente calibrado de acordo com os dados de uma estação de medição e verificado através das informações oriundas de outros dez pontos de medição (COLLISCHONN *et al.*, 2007).

Em seguida, o mesmo modelo foi aplicado sem calibração de parâmetros à bacia do Alto Uruguai, admitindo-se como verdadeira a relação entre uso da terra/cobertura vegetal e valores dos parâmetros correspondentes determinada para a bacia do Rio Taquari-Antas, cujos resultados apontam uma tendência de superior qualidade em elementos fluviais que drenam grandes bacias hidrográficas, ainda que se hajam obtido resultados satisfatórios nos pontos internos, de modo que a performance do modelo não piorasse significativamente do período de calibração para o de validação (COLLISCHONN *et al.*, 2007).

As vazões calculadas na bacia do Rio Uruguai foram próximas das observadas para medidas com áreas de drenagem variantes entre 5356 km² a 52671 km², apesar de que erros grandes no rendimento total de erro tenham sido constatados em três tributários. Finalmente, os mesmos autores concluem que o uso de parâmetros entre bacias semelhantes é válido para as condições presentes no sul do Brasil, pois os solos rasos e impermeáveis levam o escoamento superficial a ser dominante na hidrografia local (COLLISCHONN *et al.*, 2007).

Bayer e Collischonn (2013) colocam que a alteração de parâmetros relacionados à vegetação implica em impactos de aumento ou de redução da vazão média de longo termo. A ordem de grandeza dos impactos nas vazões médias de longo termo simuladas em estudos de caso executados sob a condição simulada de desmatamento é igual à de resultados de estudos experimentais com grande número de bacias pareadas (BAYER; COLLISCHONN, 2013).

Dessa forma, apesar das incertezas naturais do processo de simulação e dos parâmetros a serem utilizados, o MGB-IPH demonstra ser capaz de representar satisfatoriamente os impactos hidrológicos dirigidos pelo desmatamento. Ao mesmo tempo, existe uma grande incerteza quanto ao parâmetro de resistência superficial da vegetação, que os autores

simplificadamente consideraram iguais para floresta e para pastagem em seu estudo (BAYER; COLLISCHONN, 2013).

Em sua análise, os autores não aplicaram mudanças no parâmetro de armazenamento de água no solo, notado por W_m , responsável por indicar o volume de água disponível (no solo), e nem mesmo consideraram as diferenças entre a profundidade das raízes da floresta e da pastagem. Caso o W_m houvesse sido incluído, ou se as diferenças de profundidade das raízes houvessem sido tomadas, as diferenças de evapotranspiração e de escoamento em áreas de floresta e de pastagem poderia ser mais evidente (BAYER; COLLISCHONN, 2013).

Portanto, os próprios autores recomendam que os mesmos cenários venham a ser analisados em modelos com um balanço mais complexo de água no solo, ou seja, modelos cuja capacidade de representar o armazenamento se estenda às camadas do solo e ao fluxo de água em meio não saturado (BAYER; COLLISCHONN, 2013).

Destaca-se ainda que, por razão da simplificação da análise, os resultados das simulações nas três bacias estudadas (as bacias pareadas dos rios Ji-Paraná, Rio das Almas e Jacuí) foram obtidos sem que se calibrasse com antecedência o modelo hidrológico para cada uma delas. Desse modo, os resultados devem passar por uma interpretação relativa, e jamais absoluta (BAYER; COLLISCHONN, 2013).

Brito Neto *et al.* (2021) tratam de que o MGB-IPH foi satisfatoriamente validado para seu ambiente de pesquisa, a estação 53880000 da Agência Nacional de Águas (ANA). Apesar de haver subestimado os picos de vazões máximas, o modelo ofereceu uma boa representação dos dados observados perante a sazonalidade das vazões, das diferenciações entre anos mais úmidos e mais secos, bem como dos picos de cheias de média e pequena intensidade.

Houve, de acordo com os autores, sensibilidade do MGB-IPH na identificação do impacto das mudanças do uso e ocupação do solo nas vazões simuladas para a bacia do Rio Pardo, sendo que no ano de 2016 concentraram-se maiores valores de vazões mensais médias, totais, máximas e mínimas em comparação com 2021 (BRITO NETO *et al.*, 2021).

O MGB também pode ser usado em contextos distintos, como: associação de seus resultados a dados observados por detenção remota como meio de validação (PAIVA *et al.*, 2013);

simulação da propagação de hidrogramas de rompimento de barragens (TSCHIEDEL; PAIVA; FAN, 2020).

De acordo com Medeiros *et al.* (2019), a calibração do MGB se dá através do ajuste dos parâmetros de solo, que são os parâmetros calibráveis do modelo. Além disso, existem os parâmetros de vegetação (não calibráveis), que dizem respeito à cobertura do solo (MEDEIROS *et al.*, 2019).

2.1.2 Modelo HBV

O modelo HBV é um dos mais utilizados modelos hidrológicos em termos mundiais, sendo um modelo concentrado, ou seja, que não se vale da discretização da área da bacia hidrográfica (CLAESSON; MOLAVI, 2020). A principal vantagem dos modelos concentrados sobre os modelos distribuídos é a de que aqueles tendem a dispor de uma aplicação mais simples do que a verificada nos modelos distribuídos (MEDINA; MUÑOZ, 2020).

Burhan *et al.* (2020) aplicaram o modelo HBV para a verificação de mudanças hidrológicas e meteorológicas na região com domínio de neve da bacia do Rio Chitral, no Paquistão, região essa vulnerável a mudanças climáticas. De modo geral, o modelo apresentou boas condições de calibração.

Sarrazin, Pianosi e Wagener (2016) empregaram o HBV em uma análise de sensibilidade executada para diversos modelos hidrológicos, vindo a concluir que os dados tipicamente fornecidos na literatura para Global Sensitivity Analysis (GSA) são normalmente insuficientes para que se atinja a convergência dos resultados para o modelo HBV.

Nilsson, Uvo e Berndtsson (2006) executaram a comparação de desempenho entre o modelo HBV, sendo este uma forma de modelagem conceitual de escoamento, e redes neurais artificiais. Foi observado que, embora as redes neurais tenham apresentado melhores resultados de modo direto, a combinação de tais redes com a modelagem conceitual, de maneira que dados de entrada para as redes neurais, como dados de precipitação, mostra uma grande eficiência da simulação de escoamentos mensais (NILSSON; UVO; BERNDTSSON, 2006).

Medina e Muñoz (2020), a partir de uma análise de sensibilidade, mostraram que nos rios com regimes luviais, o HBV é sensível aos parâmetros de solo e de evapotranspiração. O estudo foi feito nas bacias hidrográficas dos rios Iñaque, Cruces, Grey e Paine, situadas no Chile (MEDINA; MUÑOZ, 2020).

2.2 MÉTRICAS DE DESEMPENHO DO MGB

Basicamente o MGB utiliza três parâmetros para medir a eficiência dos dados simulados. Dois desses parâmetros são as funções objetivo denominadas coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NASH) e coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos (NASHLOG) calculados conforme as equações 1 e 2, considerando-se que o último é mais influenciável pelas menores vazões (OLIVEIRA *et al.*, 2019; NASH; SUTCLIFFE, 1970).

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m_i} - Q_{s_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m_i} - \overline{Q_m})^2} \quad (1)$$

$$NASHLOG = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{m_i}) - \log(Q_{s_i}))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{m_i}) - \log(\overline{Q_m}))^2} \quad (2)$$

Sendo Q_m a vazão medida na estação (m^3/s), Q_s a vazão simulada (m^3/s), n o número de vazões medidas e calculadas, e $\overline{Q_m}$ a média das vazões medidas (m^3/s).

Já o parâmetro PBIAS, percentual de viés, também utilizado pelo MGB, é tratado segundo a equação 3 (OLIVEIRA *et al.*, 2019; EDUARDO *et al.*, 2016; GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999):

$$PBIAS = 100\% * \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m_i} - Q_{s_i})}{\sum_{i=1}^n Q_{m_i}} \quad (3)$$

As tabelas 3 e 4 trazem limites numéricos e seus significados para os coeficientes NASH e NASHLOG e para o percentual de viés, respectivamente.

Tabela 3. Intervalos dos coeficientes NASH e NASHLOG e seus significados para modelos avaliados.

Intervalos de NASH E NASHLOG	Qualidade do modelo
De 0 a 0,36	Ruim
Maior que 0,36 a 0,75	Aceitável
Maior que 0,75 a 1,00	Boa

Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.* (2019); Liew; Arnold; Garbrecht (2003).

Tabela 4. Intervalos do módulo do percentual de viés (PBIAS) e seus significados para modelos avaliados.

Intervalos de PBIAS 	Qualidade do modelo
Maior ou igual a 25%	Insatisfatório
15% a menor que 25%	Satisfatório
10% a menor que 15%	Bom
De 0% a menor que 10%	Ótimo

Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.* (2019); Liew *et al.* (2007).

Quando da calibração em si, além de NASH e NASHLOG, o modelo se vale de duas outras opções de parâmetros de medição de eficiência. Uma dessas opções está ligada à diferença percentual de volume, cujos valores negativos indicam subestimativa, enquanto que os positivos naturalmente apontam para o cenário contrário, o de superestimativa, restando ao valor nulo o papel de representar o acerto absoluto da simulação. Portanto, quanto mais próximo a zero for o valor retornado pela função, melhor é a eficiência calculada para o modelo (PONTES *et al.*, 2015; BRITO NETO *et al.*, 2021).

No caso, para a calibração, o MGB utiliza o módulo da diferença percentual de volume, de modo a evitar valores negativos. A outra opção é o erro percentual entre os valores simulado e observado da vazão Q_{90} , que quanto mais próximo a zero é também melhor, sendo Q_{90} a vazão de 90% de permanência (LAURENTIS, 2012). As equações que permitem determinar os erros do volume e do cálculo da vazão Q_{90} são respectivamente as equações 4 e 5 (PONTES *et al.*, 2015; BRITO NETO *et al.*, 2021; LAURENTIS, 2012):

$$\Delta V(\%) = 100\% * \frac{\sum_{i=1}^n Q_{s_i} - \sum_{i=1}^n Q_{m_i}}{\sum_{i=1}^n Q_{m_i}} \quad (4)$$

Sendo $\Delta V(\%)$ o erro percentual de volume (%).

$$\Delta Q_{90}(\%) = 100\% * \frac{Q_{s90} - Q_{m90}}{Q_{m90}} \quad (5)$$

Sendo $\Delta Q_{90}(\%)$ o erro percentual no cálculo da vazão de 90% de permanência (%), Q_{s90} a vazão simulada associada à vazão medida de 90% de permanência (m^3/s), e Q_{m90} a vazão medida de 90% de permanência (m^3/s).

Como alternativa, ainda pode ser utilizado o coeficiente de determinação múltipla (R^2), capaz de apontar a porcentagem da variação total dos dados que pode ser explicada pelas variáveis consideradas em conjunto, ou seja, indicar a porcentagem da variação dos dados que o modelo utilizado em uma simulação consegue explicar (MATA; SOUZA, 2000).

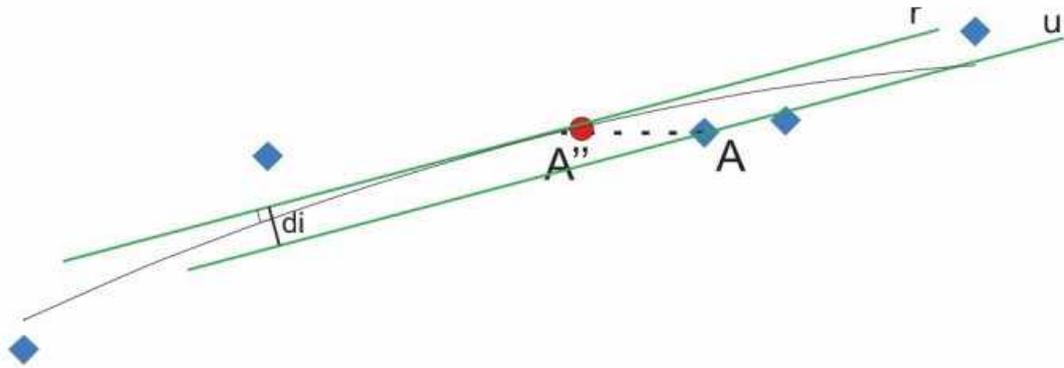
2.3 BASES PARA NOVAS MÉTRICAS DE DESEMPENHO

2.3.1 Conceitos aplicados no desenvolvimento de novas métricas

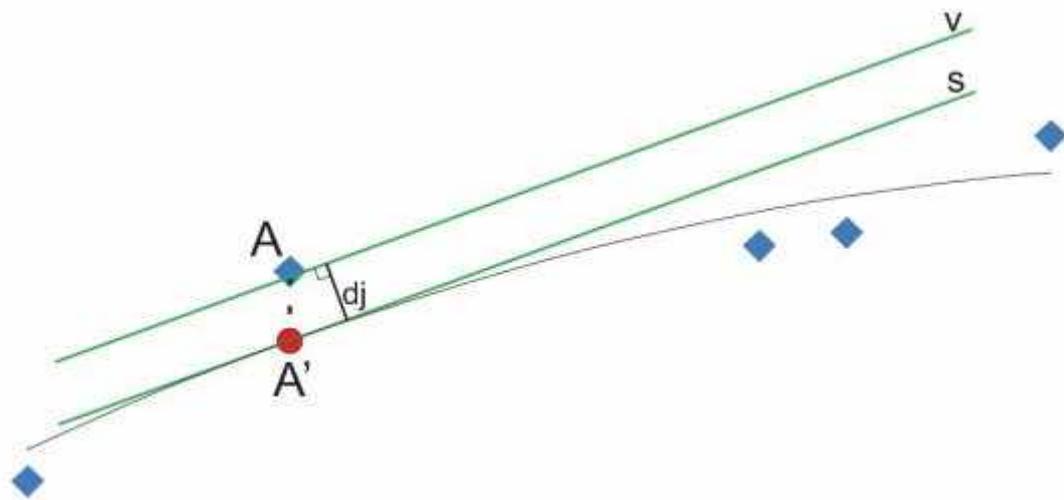
Bueno (2020) propõe a seguinte análise de dados aproximados por linhas de tendência: cada ponto de dispersão pode ser individualmente analisado com relação à curva de aproximação do conjunto de dados quando comparado com os demais do conjunto. Todo o processo de comparação se inicia quando o ponto é projetado sobre a curva, horizontal e verticalmente, gerando nesta pontos projetados. Então, a derivação da função da linha permite que retas tangentes à mesma sejam traçadas passando pelos pontos projetados. A Figura 1 demonstra graficamente o conceito das projeções.

O interesse do trabalho de Bueno (2020) como base para o desenvolvimento de novas métricas de eficiência na presente pesquisa é o de aplicar a classificação de dados de acordo com sua posição em relação ao comportamento médio dos dados de um determinado conjunto, conforme será descrito nesta seção.

FIGURA 1 - Projeções (a) horizontal e (b) vertical sobre uma linha de tendência, sendo mostradas as distâncias d_i e d_j entre retas paralelas, respectivamente para as projeções horizontal e vertical



(a)



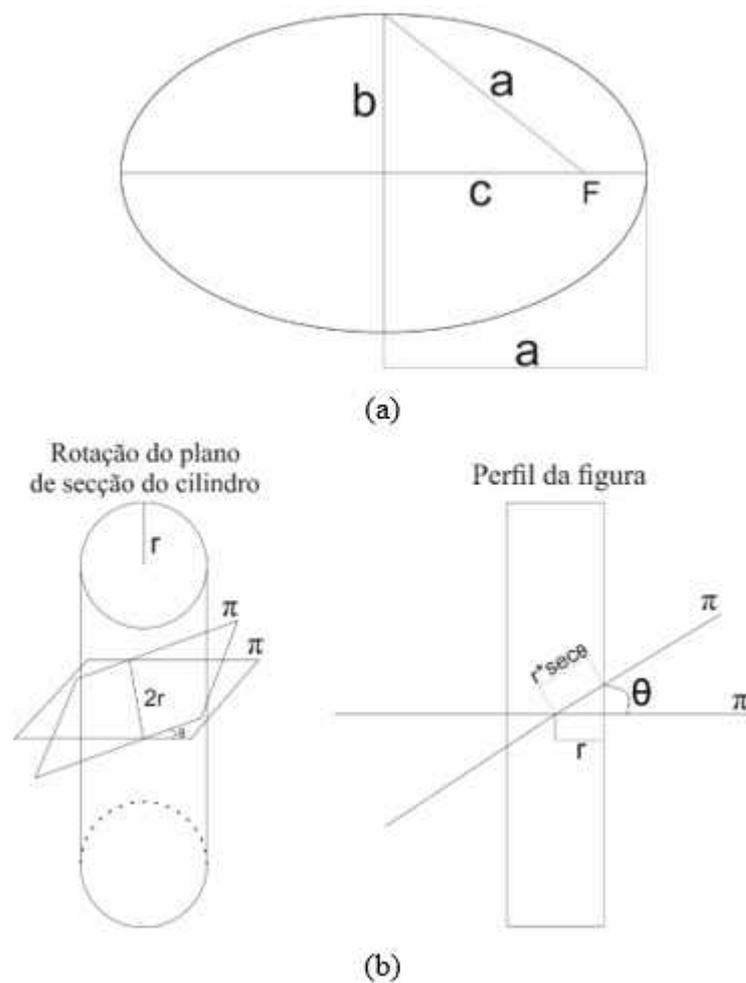
(b)

Fonte: Adaptado de Bueno (2020).

O roteiro proposto consiste no seguinte: ε (graus), k (km) e j (km) são parâmetros calculados que dizem respeito ao formato de bacias hidrográficas vizinhas. Dessa forma, cada bacia do conjunto possui um valor de ε , um valor de k e um valor de j . Assim, são montados dois gráficos de dispersão: $k \times \varepsilon$ e $j \times \varepsilon$, com k e j no eixo y , em função de ε , que permanece no eixo x . Assim, uma linha de tendência é plotada para cada uma das duas situações (BUENO, 2020).

Sobre o significado dos parâmetros inseridos no sistema de projeções tratado na figura, tem-se que k , j e ε são parâmetros oriundos da aproximação do formato de bacias hidrográficas por meio de elipses (BUENO, 2020). A Figura 2 aponta a origem desses parâmetros.

FIGURA 2 - (a) Elipse com destaque para o foco, o semi-eixo maior, o semi-eixo menor e a distância do centro ao foco; (b) rotação de um plano sobre o eixo que contém o diâmetro da circunferência de um cilindro de base circular



Fonte: Adaptado de Bueno (2020).

Sendo assim, k e j são calculados pelas equações 6 e 7, respectivamente (BUENO, 2020):

$$k = \frac{a+b+c}{2} \quad (6)$$

Sendo k o semiperímetro do triângulo retângulo formado pela distância do centro ao foco da elipse, por seu semi-eixo maior e por seu semi-eixo menor (u.c.), a o semi-eixo maior da elipse (u.c.), b o semi-eixo menor da elipse (u.c.), e c a distância do centro ao foco (u.c.).

$$j = \frac{a-b-c}{2} \quad (7)$$

Sendo j um segundo parâmetro, também determinado em função das medidas dos lados do triângulo retângulo (u.c.).

A partir da Figura 2, pode-se concluir o que é mostrado na Figura 3, ou seja, que o semi-eixo menor b , é igual ao raio r da circunferência base do cilindro, e que o semi-eixo maior a é igual ao raio r multiplicado pela secante do ângulo de rotação θ do plano π .

FIGURA 3 - Secções planares no cilindro em função do ângulo θ

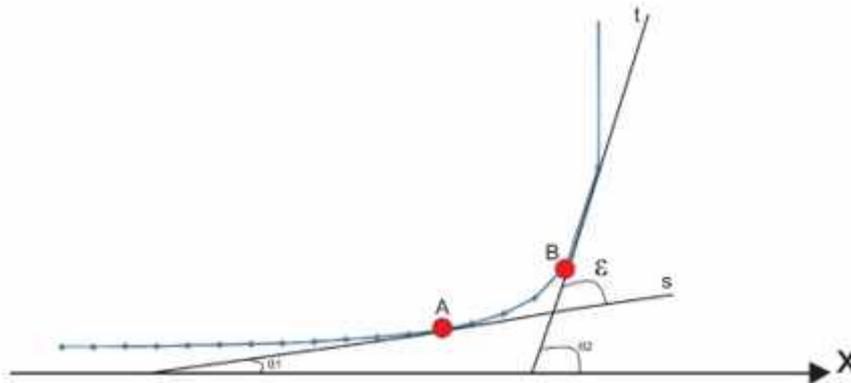


Fonte: Adaptado de Bueno (2020).

Logo, a razão a/b é igual à secante do ângulo θ , e tendo-se que $0^\circ < \theta < 90^\circ$, pode-se considerar que uma elipse representativa do formato de uma bacia hidrográfica seja tratada como um ponto na curva da função $\sec\theta$ para o intervalo $0^\circ < \theta < 90^\circ$. Naturalmente, esse ponto possui como coordenada x o valor de θ e como coordenada y o valor de $\sec\theta$ (BUENO, 2020).

Obtendo-se as retas tangentes à curva da função $\sec\theta$ nos pontos correspondentes às eipses, podem-se conhecer seus ângulos de inclinação, bem como a diferença entre eles. Isso é útil, já que se busca comparar o formato da bacia principal de um determinado conjunto de bacias, com os formatos das demais bacias (BUENO, 2020). A Figura 4 aponta essa condição.

FIGURA 4 - Elipses representativas de formatos de bacias hidrográficas fictícias (A e B) inseridas como pontos na curva da função $\sec\theta$ para o intervalo $0^\circ < \theta < 90^\circ$



Fonte: Adaptado de Bueno (2020).

Na figura, α_2 corresponde ao maior ângulo de inclinação (graus), α_1 ao menor ângulo de inclinação (graus), e ε à diferença entre ambos (graus), conforme a equação 8 (BUENO, 2020):

$$\varepsilon = \alpha_2 - \alpha_1 \quad (8)$$

Retomando-se a construção da linha de tendência, tudo o que é feito para $k \times \varepsilon$ é igualmente válido para $j \times \varepsilon$. Portanto, visando a uma menor demanda de texto, será somente elaborada a situação de $k \times \varepsilon$, entendendo-se que o mesmo é aplicável ao caso análogo. Enfim, ao se projetar um ponto horizontalmente, mantém-se a sua imagem (k) e altera-se o seu valor de ε para ε'' . Já ao projetá-lo verticalmente, o valor de ε é conservado, ao passo que a imagem é alterada de k para k' (BUENO, 2020).

Sendo o ponto original, fora da linha de tendência, $O(\varepsilon; k)$, e a função da curva $f(x)$, tendo-se ainda os pontos projetados $O''(\varepsilon''; k)$ (projeção horizontal) e $O'(\varepsilon; k')$ (projeção vertical), entende-se que o coeficiente angular da reta tangente à curva em O'' é $f'(\varepsilon'')$, enquanto que o referido coeficiente para a reta tangente à mesma curva no em O' é $f'(\varepsilon)$. Logo, a reta paralela àquela passante por O'' tem como coeficiente angular $f'(\varepsilon'')$, ao mesmo tempo em que a reta paralela àquela passante por O' tem $f'(\varepsilon)$ como o dito multiplicador (BUENO, 2020).

Bueno (2020) então coloca que as equações 9, 10 e 11 correspondem respectivamente ao cálculo das distâncias d_i , entre a reta tangente à linha de tendência em O'' e sua paralela

passante por O, d_j , entre a reta tangente à linha de tendência em O' e sua paralela passante por O, e d_c , a distância resultante, igual à média geométrica de d_i e d_j .

$$d_i = \frac{\mu_l - \mu_m}{\sqrt{(f'(\varepsilon''))^2 + 1}} \quad (9)$$

Sendo μ_l o maior valor entre $f'(\varepsilon'') * \varepsilon'' - k$ e $f'(\varepsilon'') * \varepsilon - k$, e μ_m o menor entre eles.

$$d_j = \frac{\mu_n - \mu_o}{\sqrt{(f'(\varepsilon))^2 + 1}} \quad (10)$$

Sendo μ_n o maior valor entre $f'(\varepsilon) * \varepsilon - k$ e $f'(\varepsilon) * \varepsilon - k'$, e μ_o o menor entre eles.

$$d_c = \sqrt{d_i * d_j} \quad (11)$$

Com base no que representam μ_l , μ_m , μ_n e μ_o , é possível reescrever as equações 9 e 10 conforme as equações 12a, 12b e 13:

$$d_i = \frac{|f'(\varepsilon'') * \varepsilon'' - k - [f'(\varepsilon'') * \varepsilon - k]|}{\sqrt{[f'(\varepsilon'')]^2 + 1}} = \frac{|f'(\varepsilon'') * \varepsilon'' - k - f'(\varepsilon'') * \varepsilon + k|}{\sqrt{[f'(\varepsilon'')]^2 + 1}} = \frac{|f'(\varepsilon'') * \varepsilon'' - f'(\varepsilon'') * \varepsilon|}{\sqrt{[f'(\varepsilon'')]^2 + 1}} \quad (12a)$$

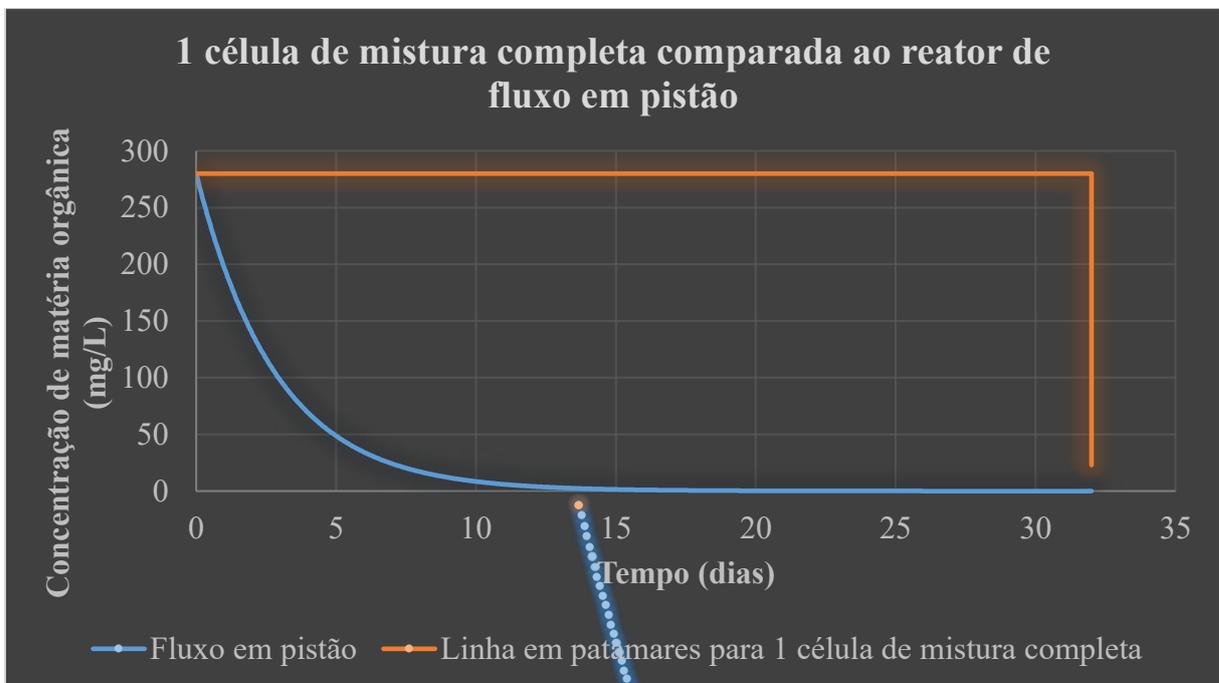
$$d_i = \frac{\sqrt{[f'(\varepsilon'') * \varepsilon'' - f'(\varepsilon'') * \varepsilon]^2}}{\sqrt{[f'(\varepsilon'')]^2 + 1}} = \sqrt{\frac{[f'(\varepsilon'') * \varepsilon'' - f'(\varepsilon'') * \varepsilon]^2}{[f'(\varepsilon'')]^2 + 1}} = \sqrt{\frac{[f'(\varepsilon'') * (\varepsilon'' - \varepsilon)]^2}{[f'(\varepsilon'')]^2 + 1}} \quad (12b)$$

$$d_j = \frac{|f'(\varepsilon) * \varepsilon - k - (f'(\varepsilon) * \varepsilon - k')|}{\sqrt{[f'(\varepsilon)]^2 + 1}} = \frac{|f'(\varepsilon) * \varepsilon - k - f'(\varepsilon) * \varepsilon + k'|}{\sqrt{[f'(\varepsilon)]^2 + 1}} = \frac{|k' - k|}{\sqrt{[f'(\varepsilon)]^2 + 1}} = \frac{\sqrt{(k' - k)^2}}{\sqrt{[f'(\varepsilon)]^2 + 1}} = \sqrt{\frac{(k' - k)^2}{[f'(\varepsilon)]^2 + 1}} \quad (13)$$

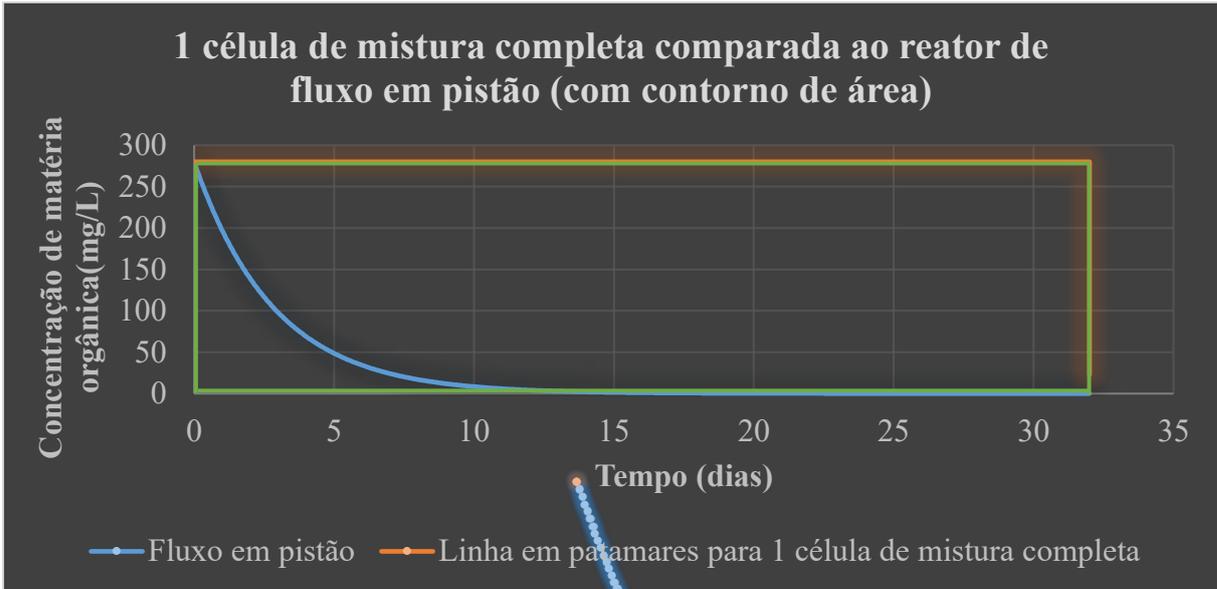
Sendo tal procedimento repetido para todos os pontos do conjunto, uma análise pode ser elaborada a partir das 3 distâncias conhecidas, bastando que seja determinada a média aritmética de todos os valores de d_i , d_j e d_c , e que sejam comparados com as médias aritméticas correspondentes cada valor de d_i , d_j e d_c para que os pontos a que estes dizem respeito sejam classificados como acima da média, na média, ou abaixo da média (BUENO, 2020).

É encontrado no trabalho de Bueno, Pereira e Moraes (2021) um método que utiliza coeficientes para a aferição da qualidade do tratamento de esgoto em reatores de mistura completa. A base do cálculo introduzido consiste na comparação de reatores desse tipo em série com uma condição ideal de fluxo em pistão. Os gráficos 1 e 2 ilustram as bases geométricas que definem esses coeficientes, e o interesse do uso de tal trabalho na presente pesquisa é a aplicação dos comparativos de áreas gráficas e comprimentos de linhas na elaboração de novas métricas de desempenho. Esses comparativos serão descritos logo a seguir, nesta mesma seção.

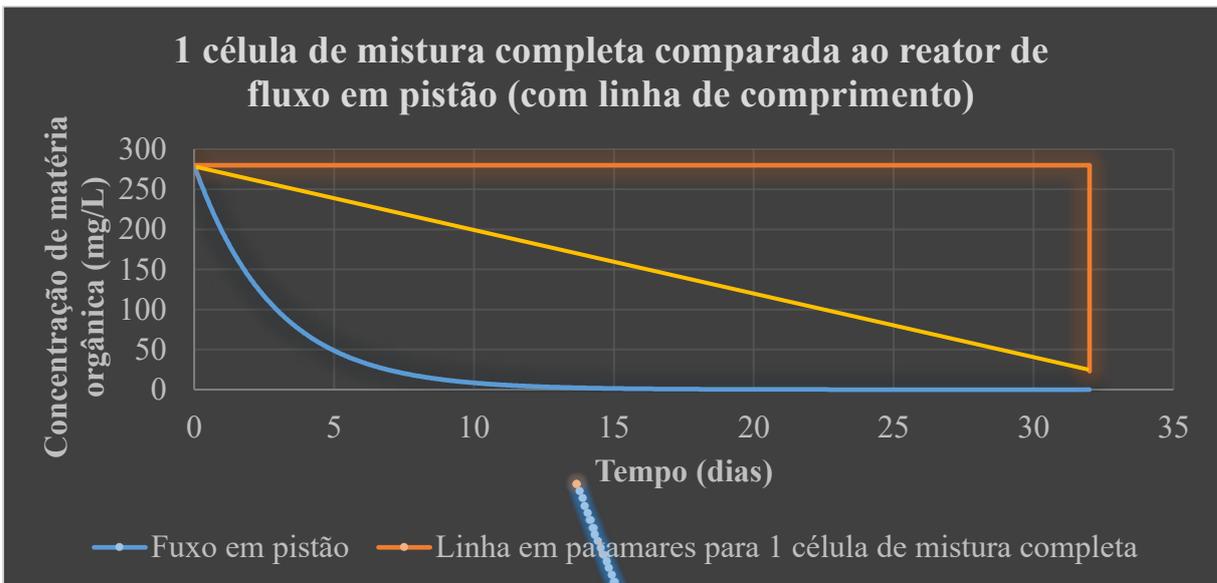
GRÁFICO 1 - (a) Gráfico original dos reatores e (b) destaque das áreas e (c) linhas de comprimento para 1 célula de mistura completa comparada ao reator de fluxo em pistão



(a)



(b)



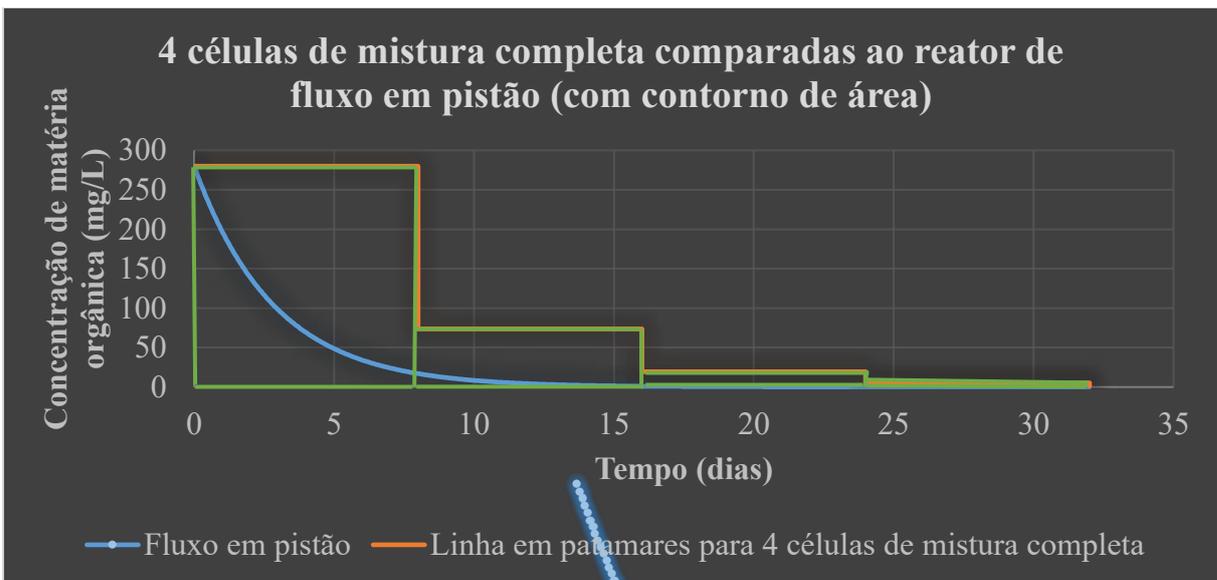
(c)

Fonte: Adaptado de Bueno, Pereira e Morais (2021).

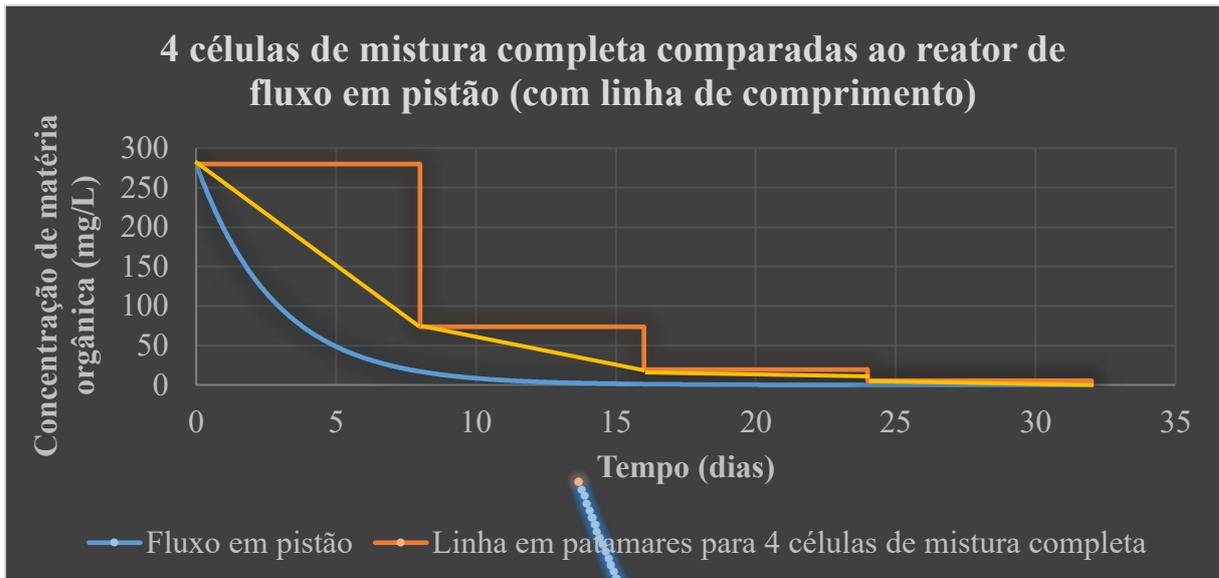
GRÁFICO 2 - (a) Gráfico original dos reatores e (b) destaque das áreas e (c) linhas de comprimento para 1 célula de mistura completa comparada ao reator de fluxo em pistão



(a)



(b)



Fonte: Adaptado de Bueno, Pereira e Morais (2021).

O cenário que se desenha é o seguinte: à medida em que se eleva o número de células de mistura completa na série de tratamento, aumenta a eficiência do processo, de modo que o comportamento do decaimento da concentração de matéria orgânica no efluente tende a se aproximar daquele observado na condição do reator de fluxo em pistão, que é a opção mais eficiente em comparação com reatores de mistura completa em uma série com igual tempo de detenção hidráulica (SPERLING, 1996). Portanto, quando tende ao infinito o número de câmaras de mistura completa, obtém-se a equivalência ao fluxo em pistão (BERNARDO; BOTARI; SABOGAL-PAZ, 2005).

Assim, quanto mais células são inseridas na série, mais patamares são formados no gráfico, e menor tende a ser a área abaixo da linha gráfica correspondente à mistura completa, que é igual ao somatório das áreas dos retângulos sinalizados com contorno verde nas figuras assinaladas com (b) nos gráficos. Sendo a eficiência do fluxo em pistão a maior, a área abaixo de sua curva é a mais reduzida, devido ao decaimento maior e mais acelerado da concentração de matéria orgânica. Logo, quanto mais células existirem, mais próximas serão as áreas abaixo da curva do fluxo em pistão e do gráfico de mistura completa (SPERLING, 1996; BERNARDO; BOTARI; SABOGAL-PAZ, 2005; BUENO; PEREIRA; MORAIS, 2021).

Concomitantemente, quanto mais células existem no sistema, mais o somatório das hipotenusas, destacadas em linhas amarelas, aproxima-se do comprimento da curva de fluxo

em pistão, sendo notório que, por se tratar de linhas retas, o somatório de hipotenusas é sempre inferior ao comprimento da curva, o exato oposto do que acontece no caso das áreas, que são sempre maiores para a mistura completa e menores para o fluxo em pistão (SPERLING, 1996; BERNARDO; BOTARI; SABOGAL-PAZ, 2005; BUENO; PEREIRA; MORAIS, 2021).

Portanto, ao se fazerem a razão da área abaixo da linha da curva do fluxo em pistão pelo somatório das áreas dos retângulos abaixo do gráfico da mistura completa, bem como a razão do somatório das hipotenusas pelo comprimento da curva do fluxo em pistão, determinam-se dois coeficientes variantes entre 0 e 1, de maneira que indicam um resultado melhor quanto maiores figurarem, projetando tal comportamento em um terceiro coeficiente igual à sua média aritmética (BUENO; PEREIRA; MORAIS, 2021).

Em termos de nomenclatura, ao se fazer a razão entre a área abaixo da curva do fluxo em pistão pela área abaixo do gráfico de mistura completa, obtém-se o coeficiente R_1 , ao passo em que a razão entre o somatório de hipotenusas e o comprimento da curva de fluxo em pistão, tem-se o coeficiente R_2 , e por conseguinte, o coeficiente R , que é determinado pela média aritmética de R_1 e R_2 , conforme as equações 14, 15 e 16 (BUENO; PEREIRA; MORAIS, 2021):

$$R_1 = \frac{C_0 * (1 - e^{-K*t})}{K * \sum_{i=1}^N t_i * C_{i-1}} \quad (14)$$

Sendo R_1 o coeficiente relativo às áreas gráficas ($0 \leq R_1 \leq 1$), C_0 a concentração inicial de matéria orgânica (mg/L), K a constante de reação da substância no reator para 1ª ordem (dia^{-1}), t o tempo de detenção total para todos os pistões considerados (dias), N o número de células consideradas, t_i o tempo de detenção da célula i (dias), e C_{i-1} a concentração de matéria orgânica anterior à entrada do reator ao qual se refere o tempo de detenção t_i , ou a concentração inicial, caso este seja o primeiro e/ou o único reator (mg/L).

$$R_2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{t_i^2 + (C_{i-1} - C_i)^2}}{\sum_{i=0}^D \frac{\sqrt{1 + (K*C_0)^2 * e^{-2*K*t_{i-1}}} + \sqrt{1 + (K*C_0)^2 * e^{-2*K*t_i}}}{2} * (t_i - t_{i-1})} \quad (15)$$

Sendo R_2 o coeficiente relativo aos comprimentos gráficos ($0 \leq R_2 \leq 1$), C_i a concentração de matéria orgânica após a passagem do afluente pelo reator i (mg/L), D o número de intervalos de discretização adotados, recomendando-se $D \geq 1000$, t_{i-1} o tempo transcorrido dentro do reator de fluxo em pistão medido no instante em que o efluente deixaria o reator de mistura completa $i-1$ (dias), e t_i o tempo transcorrido dentro do reator de fluxo em pistão medido no instante em que o efluente deixaria o reator de mistura completa i (dias).

$$R = \frac{R_1 + R_2}{2} \quad (16)$$

Sendo R o coeficiente médio de R_1 e R_2 ($0 \leq R \leq 1$).

Ainda no sentido de avaliar o desempenho do MGB, Brito Neto *et al.* (2021) trabalham a subestimativa e a superestimativa que o modelo pode gerar. Em seu trabalho foi analisada a aplicação do MGB à bacia do Rio Pardo sob diferentes cenários de uso e ocupação do solo, sendo apontadas tendências de subestimativas.

Essas tendências apareceram nos picos das vazões, tanto no período de calibração, quanto no período de validação, apesar de ter sido determinada uma representação satisfatória dos dados observados em termos da sazonalidade das vazões, da diferenciação de anos mais úmidos e mais secos, além da elaboração dos picos de pequena e média intensidade. As divergências mencionadas são tidas como passíveis de serem atribuídas à presença de períodos com inconsistências nas vazões observadas (BRITO NETO *et al.*, 2021).

Em uma direção parecida, apontando possíveis razões para grandes diferenças encontradas entre os dados observados e os calculados, Carvalho, Costa e Frago Junior (2019) relatam que, ao aplicarem o modelo às bacias dos rios Mandaú e Paraíba do Meio, constataram haver a tendência de superestimativa das vazões tanto nos períodos de estiagem quanto nos períodos chuvosos para a bacia do Mandaú, bem como a subestimativa das vazões nos picos para a bacia do Paraíba do Meio.

No trabalho foi utilizado um produto de chuva interpolada para todo o Brasil como fonte de dados no intuito de avaliar o uso de fontes alternativas de dados para a modelagem hidrológica em bacias com dados escassos, e por terem sido observadas tais limitações,

análises para trabalhos vindouros foram propostas, tais como: estudo das incertezas que a chuva interpolada pode acarretar na modelagem hidrológica, otimização de áreas mínimas de bacias onde a chuva interpolada é capaz de capturar a heterogeneidade da precipitação (CARVALHO; COSTA; FRAGOSO JUNIOR, 2019).

2.3.2 *Análise e composição de métricas na literatura*

Koch, Demirel e Stisen (2018) executaram o teste da composição de métricas *Spatial Efficiency* (SPAEF), cujos componentes (correlação, coeficiente de variação e sobreposição de histograma) são igualmente ponderados, demonstrando assim que a aplicação de métricas com múltiplos componentes é desejável para modelos espaciais, uma vez que métricas independentes tendem a falhar no fornecimento de resultados de completude holística dos fenômenos hidrológicos. O interesse do trabalho de Koch, Demirel e Stisen (2018) para a presente pesquisa se encontra na ideia de composição de métricas.

Na literatura, diversos trabalhos são de interesse para esta pesquisa, haja vista que buscaram desenvolver e/ou testar métricas de eficiência para a modelagem hidrológica, evidenciando assim diferentes perspectivas estatísticas para a avaliação da qualidade de resultados, estando diretamente imbuídos no desenvolvimento estatístico, como está o presente trabalho.

Dentre esses trabalhos figura aquele desenvolvido por Gupta *et al.* (2009), onde são evidenciados os possíveis problemas de calibração oriundos da interação entre os componentes da métrica de Nash-Sutcliffe, amplamente utilizada, sendo apresentado como alternativa o coeficiente de eficiência de Kling-Gupta (KGE) que visa a reduzir tais problemas.

Outras métricas já desenvolvidas são *Root Mean Square Error* (RMSE) e *Mean Absolute Error* (MAE), sendo que RMSE tende a ser mais eficiente quando de uma distribuição gaussiana de erros (CHAI; DRAXLER, 2014), enquanto que MAE tende a se mostrar superior caso se desejem evitar possíveis ambiguidades apresentadas por RMSE (WILLMOTT; MATSUURA; ROBESON, 2009). Basicamente, Willmot, Matsuura e Robeson (2009) são favoráveis ao uso de MAE em detrimento de RMSE, ao que se contrapõem Chai e Draxler (2014).

Ao mesmo tempo, a métrica denominada *Akaike's Information Criterion* (AIC) foi desenvolvida para ser aplicada a casos em que existem conjuntos muito extensos de dados, tendendo a ser mais útil quando do emprego de modelos mais complexos e que sofrem com a equifinalidade dos parâmetros envolvidos (SCHOUPS; GIESEN; SAVENIJE, 2008).

No campo dos indicativos de incerteza, a métrica tratada como *Average Relative Interval Length* (ARIL) é destinada a aferir a amplitude dos limites de incerteza em relação aos valores observados (NASSERI *et al.*, 2013).

Já Ahmadi, Nasseri e Solomatine (2019) e Xiong *et al.* (2009) discorrem sobre a métrica *Percentage of Coverage* (POC), que aponta o percentual de instâncias analisadas que se encontram dentro da faixa de incertezas a partir dos resultados gerados na modelagem. Ahmadi, Nasseri e Solomatine (2019) destacam que o valor de POC é variante entre 0 e 1, de modo que quanto maior for o número resultante, maior será o percentual de instâncias inseridas nas bandas de incerteza. Sabe-se também que POC pode ser uma métrica conflitante com ARIL, já que bandas de incerteza mais largas tendem a conter um maior percentual de instâncias inseridas.

Justamente por existir tal conflito, a métrica *Normalized Uncertainty Efficiency* (NUE) foi desenvolvida como sendo uma combinação entre ARIL e POC, de maneira que quanto mais elevados forem seus valores resultantes, melhor será o cenário apontado, haja vista que serão indicadas bandas de incerteza mais estreitas junto a maiores percentuais de instâncias inseridas em tais bandas (AHMADI; NASSERI; SOLOMATINE, 2019; NASSERI, 2013).

2.4 EQUACIONAMENTO DA CALIBRAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS

2.4.1 Equacionamento do modelo MGB

As equações presentes nesta seção utilizam os parâmetros de solo, já definidos na seção 4.4 deste trabalho. Dessa forma, elas são essenciais para o procedimento de calibração do modelo MGB, uma vez que ditam o significado de cada um dos parâmetros para os resultados das simulações.

Nos limites desse aspecto, sabe-se que quanto maior for W_m , maior será a camada de solo capaz de armazenar água, fazendo com que as vazões registradas no hidrograma sejam reduzidas, e vice-versa. Compreendendo-se que o escoamento é influenciado pelo armazenamento de água no solo, deve-se partir para o entendimento do escoamento superficial, partindo-se do modelo ARNO, que propõe a análise do solo como se divide em diversos elementos de armazenamento de água com volumes distintos, tal que o escoamento se inicie no momento em que o menor elemento seja completamente preenchido, e sendo todos os volumes totalmente cheios, verifica-se que toda a URH (para o MGB) está gerando escoamento, e também do modelo PDM (TODINI, 1996; MOORE; CLARKE, 1981; GAMA; FAN, 2020; IPH, 2020a). Nesse sentido, a equação 17 elabora algebricamente a fração escoada.

$$X = 1 - \left(1 - \frac{W}{W_m}\right)^{\frac{b}{b+1}} \quad (17)$$

Sendo X a fração saturada da área, W o volume de água armazenada no solo (mm), W_m a capacidade máxima de armazenamento de água no solo (mm), b um parâmetro relacionado com a URH e que define o grau de heterogeneidade da capacidade de armazenamento de água no solo.

Nessas circunstâncias, o solo seco, que apresenta um valor da fração de armazenamento igual a zero, a fração escoada será nula, ao passo que na saturação, para a fração de armazenamento igual à capacidade de armazenamento (W_m), tem-se que a fração escoada será de 1, ou seja, máxima. Para b com valor unitário, sabe-se que há uma relação linear entre a fração escoada (X) e o grau de saturação ($\frac{W}{W_m}$). À medida em que b for elevado, mais rápida será a resposta do solo aos eventos de chuva, e maior será o escoamento superficial, pois a fração escoada terá valores mais altos até que se atinja o máximo de 1. Já quando se reduz o valor de b , o exato oposto se manifesta.

As equações 18a e 18b representam a formulação do escoamento superficial no MGB. Nas próximas equações, notações como $k-1$ e k , que significam dois passos de tempo, serão utilizadas para identificar em quais intervalos temporais os escoamentos são calculados. A título de exemplo, o escoamento superficial é calculado entre os passos de tempo $k-1$ e k .

$$D_{sup_{i,j}} = \Delta t * P_{i,j} - (W_{m_j} - W_{i,j}^{k-1}) \quad \text{se } A \leq 0 \quad (18a)$$

$$D_{sup_{i,j}} = \Delta t * P_{i,j} - (W_{m_j} - W_{i,j}^{k-1}) + W_{m_j} * A^{b_j+1} \quad \text{se } A > 0 \quad (18b)$$

Sendo $D_{sup_{i,j}}$ a lâmina de escoamento superficial da URH j da minibacia i em um intervalo de tempo, Δt o intervalo de tempo (dia), $P_{i,j}$ a precipitação sobre o solo da URH j da minibacia i (mm/dia), e A um termo limite passível de ser calculado.

Quanto ao escoamento subsuperficial, este significa um escoamento mais lento que o superficial e mais rápido que o subterrâneo, ocorrendo nas camadas superficiais do solo e sendo descrito no MGB por uma relação semelhante à de Brooks e Corey (do conjunto de relações de retenção de água no solo e condutividade hidráulica), que interliga a condutividade do solo e sua textura de modo alinear em relação à umidade do mesmo solo, de modo que a taxa de drenagem subsuperficial seja muito maior para o solo em estado próximo à saturação que para o solo mais seco (RAWLS *et al.*, 1993; GAMA; FAN, 2020; IPH, 2020a). Dessa maneira, as equações 19a e 19b tratam da relação utilizada.

$$D_{int_{i,j}} = K_{int_j} * \left(\frac{W_{i,j}^{k-1} - W_{z_j}}{W_{m_j} - W_{z_j}} \right)^{3 + \frac{2}{\lambda_j}} \quad \text{se } W_{i,j}^{k-1} > W_{z_j} \quad (19a)$$

$$D_{int_{i,j}} = 0 \quad \text{se } W_{i,j}^{k-1} \leq W_{z_j} \quad (19b)$$

Sendo $D_{int_{i,j}}$ a lâmina de escoamento subsuperficial da URH j da minibacia i em um intervalo de tempo (mm/dia), K_{int_j} a condutividade hidráulica do solo saturado da URH j (mm/dia), W_{z_j} o limite mínimo de armazenamento no solo da URH j , para que ocorra o escoamento subsuperficial, sendo na maioria dos casos utilizado, para início de calibração, como 0,10, 10% de W_m (mm), e λ_j o índice de porosidade do solo da URH j , usualmente dado como 0,67.

Vale mencionar que W_{z_j} normalmente não é um parâmetro calibrado, e que λ_j e o próprio W_{z_j} atendem às seguintes descrições: W_{z_j} é denominado W_c na interface de processamento e calibração, limitando o fluxo subterrâneo e subsuperficial; λ é chamado XL na interface, sendo o parâmetro responsável pelo controle da curva de redução do reservatório

subsuperficial. Ao mesmo tempo, pode-se afirmar que K_{int} é análogo à condutividade hidráulica saturada do solo e proporcional ao grau de saturação do mesmo.

Já a percolação, ou fluxo de água do solo para o aquífero, é obtido através de uma relação linear, tal qual demonstrado pelas equações 20a e 20b.

$$D_{bas_{i,j}} = 0 \quad \text{se} \quad W_{i,j}^{k-1} \leq W_{c_j} \quad (20a)$$

$$D_{bas_{i,j}} = K_{bas} * \left(\frac{W_{i,j}^{k-1} - W_{c_j}}{W_{m_j} - W_{c_j}} \right) \quad \text{se} \quad W_{i,j}^{k-1} > W_{c_j} \quad (20b)$$

Sendo $D_{bas_{i,j}}$ o fluxo de água do solo da URH j da minibacia i para o aquífero em um intervalo de tempo (mm/dia), K_{bas} a taxa máxima de percolação do solo para o reservatório (mm/dia), e W_{c_j} o limite inferior de armazenamento no solo da URH j , para que ocorra o escoamento subterrâneo, sendo normalmente utilizado, para início de calibração, como 0,10, 10% de W_m (mm).

Sobre K_{bas} , diga-se que este é o parâmetro responsável pelo controle da quantidade de água escoada na camada subterrânea, de modo que ainda influencie a vazão durante períodos secos, sendo também análogo à condutividade hidráulica saturada e proporcional ao grau de saturação do solo.

Concomitantemente, o fluxo inverso ao da percolação, isto é, do aquífero para a zona não saturada do solo, pode ocorrer quando a zona saturada do aquífero está próxima à superfície do solo, o que se conhece como *stress* hídrico. O movimento ascendente se dá por diferença de potencial ou em função das profundas raízes da vegetação local, de modo que essas raízes sejam suficientemente longas para extrair água do aquífero de maneira direta. No MGB esse fluxo é calculado conforme as equações 21a e 21b.

$$D_{cap_{i,j}} = DM_{cap_j} * \left(\frac{W_{c_j} - W_{i,j}^{k-1}}{W_{c_j}} \right) \quad \text{se} \quad W_{i,j}^{k-1} < W_{c_j} \quad (21a)$$

$$D_{bas_{i,j}} = 0 \quad \text{se} \quad W_{i,j}^{k-1} \geq W_{c_j} \quad (21b)$$

Sendo $D_{capi,j}$ o fluxo ascendente no solo da URH j da minibacia i no intervalo de um dia (mm/dia), DM_{capj} o máximo fluxo ascendente no solo da URH j (mm/dia), e W_{cj} o limite máximo de armazenamento de água no solo da URH j para que ocorra o fluxo ascendente (mm).

Sobre DM_{capj} diga-se que este é denominado *CAP* (capilaridade) na interface do MGB, e que também é, na maioria dos casos, considerado igual a zero, ou pelo menos muito próximo ao valor nulo, tendo sua função desligada no dito *plug-in*. Diz-se de *CAP* como relacionado à ascensão capilar, conforme já descrito, sendo a fração que representa o máximo fluxo de água que parte do reservatório inferior em retorno ao solo.

Quanto ao equacionamento das vazões dos escoamentos considerados pelo modelo MGB, tem-se que a vazão que sai do reservatório superficial é, conforme a equação 22, calculado por uma função linear do volume superficial armazenado e do tempo de concentração da minibacia.

$$Q_{sup_i} = \frac{1}{TKS_i} * V_{sup_i}^{k-\frac{1}{2}} \quad (22)$$

Sendo Q_{sup_i} a vazão de saída do reservatório linear superficial da minibacia i (m³/s), TKS_i o tempo de retardo do reservatório superficial da minibacia i (s), e $V_{sup_i}^{k-\frac{1}{2}}$ o volume de água presente no reservatório superficial e na metade do intervalo de tempo na minibacia i (m³), estimado de acordo com a equação 23.

$$TKS_i = C_s * T_{ci} \quad (23)$$

Sendo C_s um dado adimensional e calibrável, e T_{ci} a estimativa do tempo de concentração da minibacia i (s).

De modo análogo, a equação 24 descreve como a vazão do escoamento subsuperficial é calculada, e o mesmo se repete nas equações 25 e 26 para o escoamento de base.

$$Q_{int_i} = \frac{1}{TKI_i} * V_{int_i}^{k-\frac{1}{2}} \quad (24)$$

Sendo Q_{inti} a vazão de saída do reservatório linear subsuperficial da minibacia i (m^3/s), TKI_i o tempo de retardo do reservatório subsuperficial da minibacia i (s), e $V_{int_i}^{k-\frac{1}{2}}$ o volume de água presente no reservatório subsuperficial e na metade do intervalo de tempo na minibacia i (m^3), estimado de acordo com a equação 25.

$$TKI_i = C_i * T_{C_i} \quad (25)$$

Sendo C_i um dado adimensional e calibrável.

O mesmo ainda se repete para o escoamento subterrâneo, conforme a equação 26.

$$Q_{bas_i} = \frac{1}{TKB_i} * V_{bas_i}^{k-\frac{1}{2}} \quad (26)$$

Sendo Q_{bas_i} a vazão de saída do reservatório linear subterrâneo da minibacia i (m^3/s), TKB_i o tempo de retardo do reservatório subterrâneo da minibacia i (s), e $V_{bas_i}^{k-\frac{1}{2}}$ o volume de água presente no reservatório subterrâneo e na metade do intervalo de tempo na minibacia i (m^3), estimado de acordo com a equação 27.

$$TKB_i = C_b * 3600 \quad (27)$$

Sendo C_b um parâmetro calibrável controlador do retardo do escoamento subterrâneo na minibacia (h).

A respeito de C_s , C_i e C_b , diga-se que o primeiro influencia no tempo dos picos, atrasando ou adiantando o hidrograma, enquanto que o segundo e o terceiro estão respectivamente associados às vazões intermediárias e à taxa de recessão dos hidrogramas. Tais notações foram adotadas neste trabalho para a manutenção dos índices, ao passo que no modelo MGB redige-se CS , CI e CB .

Finalmente, fato é que a vazão lateral que chega ao trecho de rio de cada minibacia é tão somente a soma das vazões dos escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo, tal qual o que é demonstrado na equação 28.

$$Q_i = Q_{sup_i} + Q_{int_i} + Q_{bas_i} \quad (28)$$

Sendo Q_i a vazão total gerada na minibacia i (m^3/s).

Portanto, de acordo com o exposto, podem ser feitas as seguintes considerações a respeito dos valores e das relações de dependência que se referem aos parâmetros de solo envolvidos no modelo MGB:

- $W_m \propto \frac{1}{Q}$;
- $b \propto Q_{sup}$;
- $\lambda_j \cong 0,67$;
- $W_c \cong 0,10$;
- $K_{int} \propto Q_{int}$;
- $K_{bas} \propto Q_{sub}$;
- $CAP \cong 0$;
- $C_s \propto \frac{1}{Q_{sup}}$;
- $C_i \propto \frac{1}{Q_{int}}$;
- $C_b \propto \frac{1}{Q_{sub}}$.

Diga-se que todo o roteiro de equacionamento apresentado nesta seção está embasado nas recomendações de profissionais vinculados ao HGE (GAMA; FAN, 2020) e nas instruções de uso do programa (IPH, 2020a).

2.4.2 Equacionamento do modelo HBV

A versão utilizada do modelo HBV se baseia na seguinte lógica: a água líquida advinda da precipitação, ao atingir o solo, divide-se entre os escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo, que compõem o escoamento total (UZH, 2023). Além disso, existe a parte que passa a integrar a umidade do solo e que, por consequência, sofre evapotranspiração. Esta versão considera somente a precipitação em forma de chuva, não havendo preocupação com a neve e com o seu processo de derretimento (UZH, 2023).

Baseado nisso, o equacionamento apresentado nesta seção está de acordo com o disposto no trabalho de Burhan *et al.* (2020). Inicialmente, a equação 29 trata do cálculo da precipitação efetiva pelo modelo HBV (BURHAN *et al.*, 2020).

$$P_{ef,t} = \left(\frac{H_{t-1}}{H_{máx}} \right)^\beta * P_{l,t} \quad (29)$$

Sendo $P_{ef,t}$ a precipitação efetiva no intervalo t (mm), H_{t-1} a umidade do solo no início do intervalo t (mm), $H_{máx}$ a umidade máxima possível de ser acumulada (mm), e $P_{l,t}$ a precipitação líquida no intervalo t (mm), e β o coeficiente de forma.

Em seguida, a equação 30 determina o cálculo da umidade do solo no tempo t (UFU, 2021).

$$H_t = H_{t-1} + P_{l,t} - P_{ef,t} - EV_{r,t} \quad (30)$$

Sendo H_t a umidade do solo no tempo t (mm), e $EV_{r,t}$ a evapotranspiração real no intervalo t (mm).

Então, as equações 31a e 31b levam à evapotranspiração real (BURHAN *et al.*, 2020).

$$EV_{r,t} = EV_{p,t} * \left(\frac{H_{t-1}}{PWP} \right) \quad \text{se} \quad H_{t-1} < PWP \quad (31a)$$

$$EV_{r,t} = EV_{p,t} \quad \text{se} \quad H_{t-1} > PWP \quad (31b)$$

Sendo $EV_{p,t}$ a evapotranspiração potencial no intervalo t (mm), e PWP um ponto limite constante relativo ao solo (mm).

Portanto, as equações 32a, 32b, 33, 34 e 35 mostram como são determinadas as vazões superficial, subsuperficial, subterrânea e de percolação, respectivamente (BURHAN *et al.*, 2020; UFU, 2021).

$$Q_{0,t} = K_0 * (S_{t-1} - L_{máx}) * A \quad \text{se} \quad S_{t-1} > L \quad (32a)$$

$$Q_{0,t} = 0 \quad \text{se} \quad S_{t-1} \leq L \quad (32b)$$

Sendo $Q_{0,t}$ a vazão superficial ($\text{hm}^3/\text{mês}$), K_0 a constante de escoamento superficial (dia^{-1}), S_{t-1} a lâmina líquida no reservatório superior no início do intervalo t (mm), $L_{\text{máx}}$ a lâmina limite para que comece a ocorrer o escoamento superficial (mm), e A a área da bacia hidrográfica (km^2).

$$Q_{1,t} = K_1 * S_{t-1} * A \quad (33)$$

Sendo $Q_{1,t}$ a vazão subsuperficial ($\text{hm}^3/\text{mês}$), e K_1 a constante de escoamento subsuperficial (dia^{-1}).

$$Q_{2,t} = K_2 * I_{t-1} * A \quad (34)$$

Sendo $Q_{2,t}$ a vazão subterrânea ($\text{hm}^3/\text{mês}$), K_2 a constante de escoamento subterrâneo (dia^{-1}), e I_{t-1} a lâmina líquida no reservatório inferior no início do intervalo t (mm).

$$Q_{p,t} = K_p * S_{t-1} * A \quad (35)$$

Sendo $Q_{p,t}$ a vazão de percolação ($\text{hm}^3/\text{mês}$), e K_p a constante de percolação (dia^{-1}).

Por sua vez, as equações 36 e 37 determinam o cálculo das lâminas líquidas nos reservatórios superior e inferior, respectivamente (UFU, 2021).

$$S_t = S_{t-1} + P_{l,t} - Q_{0,t} - Q_{1,t} - Q_{p,t} \quad (36)$$

Sendo S_t a lâmina líquida no reservatório superior no tempo t (mm).

$$I_t = I_{t-1} + Q_{p,t} - Q_{2,t} \quad (37)$$

Sendo I_t a lâmina líquida no reservatório inferior no tempo t (mm).

Finalmente, a equação 38 apresenta o cálculo da vazão total (BURHAN *et al.*, 2020).

$$Q_{t,t} = Q_{0,t} + Q_{1,t} + Q_{2,t} \quad (38)$$

Sendo $Q_{t,t}$ a vazão total ($\text{hm}^3/\text{mês}$).

Em suma, $H_{m\acute{a}x}$, β , PWP , K_0 , $L_{m\acute{a}x}$, K_1 , K_2 e K_p são parâmetros calibráveis, H_t , S_t e I_t são variáveis de estado, e H_0 , S_0 e I_0 (respectivamente H_t , S_t e I_t para $t=0$) são variáveis iniciais a serem arbitradas (UFU, 2021). Nesse cenário, a Tabela 5 apresenta faixas de valores típicos para os parâmetros calibráveis.

Tabela 5. Faixas de valores típicos para os parâmetros calibráveis do modelo HBV.

Parâmetro	$H_{m\acute{a}x}$	β	PWP	K_0	$L_{m\acute{a}x}$	K_1	K_2	K_p
Unidade	mm	-	mm	dia ⁻¹	mm	dia ⁻¹	dia ⁻¹	dia ⁻¹
Valor	50-650	1-5	30-650	0,05-0,5	0-100	0,01-0,4	0-0,15	0-2

Fonte: Adaptado de UFU (2021).

2.5 MAPEAMENTO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Vários trabalhos presentes na literatura destacam a forte influência do uso do solo sobre fatores ambientais relevantes. A seguir estão elencados alguns exemplos do uso do mapeamento de uso e ocupação do solo imbuído na investigação de condições ambientais.

Souza, Silva e Silva (2016) investigaram as mudanças de uso e ocupação do solo no município de João Pessoa-PB, bem como suas influências nas alterações da temperatura da superfície desde o ano de 1991 até o ano de 2010. A conclusão desse trabalho foi a de que as principais mudanças no uso do solo se deram nas classes área urbana e vegetação herbácea, sendo que as maiores temperaturas de superfície foram estimadas sobre as áreas urbanas e sobre solos expostos, e uma maior variação da temperatura foi registrada no período de 2006 a 2010, quando houve um aumento da área urbana em quase todas as porções do município (SOUZA; SILVA; SILVA, 2016).

Vanzela, Hernandez e Franco (2010) verificaram a influência de uso e ocupação do solo sobre os recursos hídricos do Córrego Três Barras, no município de Marinópolis, o estado de São Paulo. Uma análise de correlação de Parson entre os parâmetros de qualidade e disponibilidade da água na sub-bacia e os dados de uso e ocupação do solo foi aplicada para o

período de 18/01/2006 a 10/12/2007, permitindo concluir que as áreas com matas e pastagens, com menor intensidade, atuam a favor da qualidade da água, enquanto que as áreas habitadas, agricultadas e de matas degradadas atuam para a redução da qualidade e da disponibilidade de água na sub-bacia (VANZELA; HERNANDEZ; FRANCO, 2010).

Coelho *et al.* (2014) demonstraram através da aplicação de marizes de transição associadas à álgebra de mapas e métricas de paisagem sobre 3 imagens de satélite (dos anos de 1991, 2000 e 2010), compondo uma análise espaçotemporal da bacia do Rio São Paulo, situada no semiárido do estado de Pernambuco. Os resultados apontaram uma importante mudança no estado de uso e ocupação do solo ao longo do período, mostrando que houve uma substituição progressiva das áreas de caatinga aberta por áreas de pastagem e agricultura (COELHO *et al.*, 2014).

2.6 PROCESSOS ESTOCÁSTICOS

Bartlett (1978) aponta que os processos estocásticos podem ser definidos como processos estatísticos que conectam uma variável aleatória X , frequentemente confinada a um intervalo finito ou infinito de valores discretos, a uma outra variável aleatória t , que pode representar, por exemplo, o tempo, significando que X muda aleatoriamente ao longo da linha temporal. Por isso, é conveniente considerar separadamente os casos em que a variável X é discreta, como na contagem populacional, sendo ainda importante que se verifique a natureza do parâmetro t .

Segundo Bartlett (1978), se t for uma variável discreta, o processo estocástico deverá ser especificado pela distribuição probabilística simultânea de um vetor qualquer dos valores de X : $X \equiv X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_n)$. Podendo-se tratar de vetores finitos ou infinitos, é possível referir-se a este tipo de processos estocásticos como sequências aleatórias.

Fajardo e Keisler (2016) complementam essa definição indicando que o cerne do conceito de processos estocásticos está diretamente relacionado à ideia fundamental de probabilidade, o que se explicita por meio da distribuição de probabilidade.

O teorema de existência de Kolmogorov também fundamenta a caracterização dos processos estocásticos e enuncia que dada uma família de medidas probabilísticas Q em \mathbb{R}^n , tal que essa família satisfaça as condições de consistência supracitadas, existe um espaço de probabilidade com um processo estocástico e cuja distribuição dimensional finita P^n é Q (FAJARDO; KEISLER, 2016).

Segundo Costa (2006), os processos estocásticos se encontram envolvidos em muitos dos sistemas físicos que envolvem muitos corpos ou muitas variáveis, por serem os fenômenos sempre alvo de outras interações que provocam flutuações nas variáveis estudadas. Além disso, fenômenos aleatórios estão presentes em elementos como líquidos, gases, sólidos, radiação proveniente do espaço e variação meteorológica.

2.6.1 Cadeias de Markov

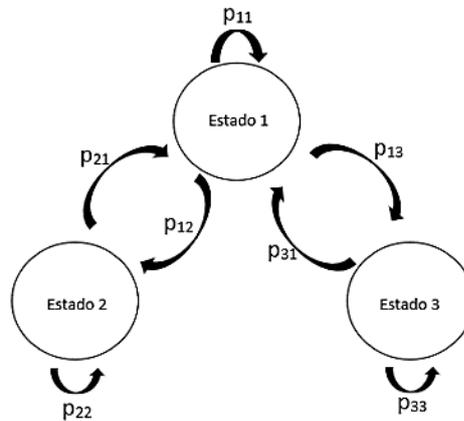
Dentro da gama de processos estocásticos figuram as cadeias de Markov. Tais processos são classificados como sem memória, ou seja, dizem respeito a um sistema cujo comportamento evolui dinamicamente com o tempo, tornando viável que se conheça o seu comportamento somente no tempo presente, podendo-se desprezar todo o histórico de evolução (TANAKA; STÁBILE, 2020).

Em suma, as cadeias de Markov são definidas como um conjunto de estados $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_r\}$, de maneira que o processo se inicie em um estado s_i , movendo-se sucessivamente para outro estado s_j com probabilidade p_{ij} , chamada probabilidade de transição, que independe de todos estados ocorridos anteriormente, vindo a depender exclusivamente do estado atual. Dessa forma, o processo pode ser alterado para um outro estado com probabilidade p_{ij} , ou mesmo conservar seu estado atual com probabilidade p_{ii} (TANAKA; STÁBILE, 2020).

A Figura 5 traz um esquema capaz de ilustrar os possíveis caminhos a serem tomados por um processo estocástico, juntamente às suas probabilidades de ocorrência. Na situação fictícia existem 3 estados possíveis (1, 2 e 3), e para cada passagem de estados há probabilidades de ocorrência: p_{11} é a probabilidade de que na passagem seja mantido o estado 1, p_{12} é probabilidade de que se passe do estado 1 para o estado 2, p_{13} é a probabilidade de que se

passa do estado 1 para o estado 3, e assim por diante. No diagrama não são apontadas p_{23} e p_{32} , isso porque não são possíveis passagens diretas entre os estados 2 e 3.

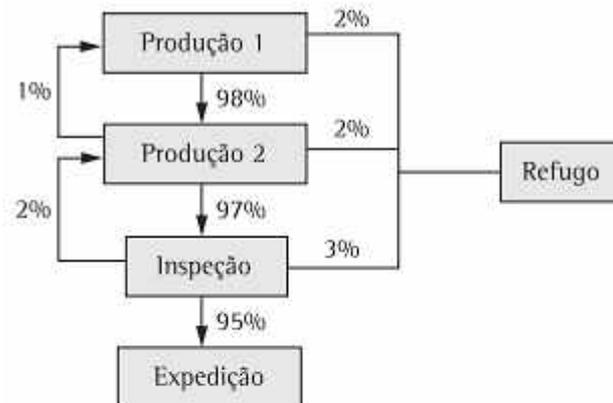
FIGURA 5 - Esquema de probabilidades em uma cadeia de Markov



Fonte: Tanaka e Stábile (2020).

A Figura 6, por sua vez, apresenta um sistema elaborado por Staudt, Coelho e Gonçalves (2011) em seu trabalho sobre o uso de cadeias de Markov em processos produtivos. Neste caso, têm-se exemplos numéricos de probabilidade, dados a partir dos quais foi construída uma matriz de transição, que é responsável por indicar a probabilidade de cada passagem de estado, ou seja, a passagem do estado que identifica a linha do valor percentual para o estado que identifica a coluna do mesmo valor.

FIGURA 6 - (a) Percentuais do processo produtivo e (b) matriz de transição consequente



(a)

$$P = \begin{array}{ccccc|cc} & P1 & P2 & I1 & Exp & R & \\ \hline P1 & 0 & 0,98 & 0 & 0 & 0,02 & P1 \\ P2 & 0,01 & 0 & 0,97 & 0 & 0,02 & P2 \\ I1 & 0 & 0,02 & 0 & 0,95 & 0,03 & I1 \\ \hline Exp & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & Exp \\ R & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & R \end{array}$$

(b)

Fonte: Adaptado de Staudt, Coelho e Gonçalves (2011).

Sobreiro (2011) executou uma aplicação direta das cadeias de Markov na engenharia. O dispositivo estatístico foi utilizado para que através de previsões construídas para o estado futuro de pontes, pudessem ser tomadas medidas preventivas e, se necessário, corretivas. Os dados de transição foram obtidos com base em observações feitas em pontes similares àquelas em que se desejava executar as previsões. As observações utilizadas basearam-se em inspeções visuais executadas nas pontes com o intuito de se detectar sua deterioração.

2.6.2 Modelagem de uso e ocupação do solo com cadeias de Markov

No campo de uso e ocupação do solo, Borges (2020) se valeu dos processos de Markov para a análise de mudanças no escoamento superficial ao longo do tempo na bacia do córrego de São Pedro, em Uberlândia, MG. O trabalho foi executado a partir do *software* TerrSet, que incorpora ferramentas de processamento de imagens IDRISI GIS e oferece um pacote de dispositivos capazes de monitorar e modelar o sistema da Terra, como é o caso do *Land*

Change Modeler, que pode ser utilizado em previsões de uso e ocupação do solo (EASTMAN, 2020).

Borges (2020) executou análises de mudanças no uso do solo da bacia entre os anos de 1998, 2008 e 2018, elaborando mapas de previsões para os anos de 2028, 2038, 2048 e 2058, mantendo assim um intervalo regular para um tratamento estatístico dado a variáveis espaciais, conforme recomendado na literatura estatística (RIMAL *et al.*, 2018).

2.7 MÉDIA MÓVEL

No presente trabalho, foram considerados 3 tipos de média móvel: média móvel simples (MMS), ponderada (MMP) e com suavização exponencial simples (MME). O cálculo de MMS e MMP é feito de acordo com as equações 39 e 40 (JACOBS; CHASE, 2012).

$$F_{t_s} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{t-i}}{n} \quad (39)$$

Sendo F_{t_s} o valor previsto no período vindouro através da média móvel simples, n o número de dados constantes no período escolhido, e A_{t-i} os dados observados nos períodos adotados para a média móvel.

$$F_{t_p} = \sum_{i=1}^n P_{t-i} * A_{t-i} \quad (40)$$

Sendo F_{t_p} o valor previsto no período vindouro através da média móvel ponderada, e P_{t-i} o valor fracionário do peso do dado observado A_{t-i} .

Já a previsão estabelecida através de MME se dá segundo a equação 41 (PEINADO; GRAEML, 2007):

$$F_{t_e} = \alpha * F_{t_s} + (1 - \alpha) * A_{t-1} \quad (41)$$

Sendo F_{te} o valor previsto no período vindouro através da média móvel com suavização exponencial simples, α a constante de suavização ($0 \leq \alpha \leq 1$), e A_{t-1} o dado observado imediatamente anterior ao dado previsto.

Algumas considerações de Jacobs e Chase (2012) sobre as médias móveis são: as médias móveis são geralmente centralizadas, mas são modelos eficientes para a previsão direta de dados no período subsequente; os períodos longos oferecem uma resposta mais suavizada, porém causa atrasos na tendência dos dados; os períodos curtos produzem mais oscilações, mas reflete melhor a tendência; a maior desvantagem do cálculo da média móvel é a exigência de que todos os dados observados precisam ser considerados no processo, o que pode demandar uma quantidade muito significativa de dados ao se tratar um conjunto grande.

Sobre a atribuição de pesos na média móvel ponderada, deve-se considerar o seguinte: de modo geral, o passado mais recente é o dado que deve receber o maior peso, por ser o que mais influencia no período futuro; caso haja sazonalidade, os pesos devem ser correspondentes ao que é imposto pelas condições da sazonalidade; a média móvel ponderada, embora mais inconveniente e onerosa em comparação com o método de suavização exponencial, é mais vantajosa sobre a média móvel simples no sentido de conseguir modificar os efeitos dos dados passados (JACOBS; CHASE, 2012).

A respeito da média móvel com suavização exponencial simples, sabendo-se que α é uma constante que varia de 0 a 1, quanto maior for o seu valor, maior será a influência do último dado observado na previsão, ao mesmo tempo que será menor a influência dos demais períodos (PEINADO; GRAEML, 2007).

Ademais, $(1 - \alpha)$ é a taxa com que a influência dos dados históricos é reduzida, sendo, portanto, $(1 - \alpha)$ válida para o período anterior ao período da previsão (último período), $(1 - \alpha)^2$ válida para o penúltimo período, $(1 - \alpha)^3$ para o antepenúltimo período, e assim por diante. Por essa razão, se o valor 1 for atribuído a α , a média móvel com suavização exponencial simples será igual à média móvel simples (PEINADO; GRAEML, 2007).

Para os 3 modelos de média móvel, existe o roteiro de cálculo da tendência de viés do período. Esse sistema está representado pela sequência de equações numeradas de 42 a 45 (PEINADO; GRAEML, 2007):

$$E_i = A_i - F_{t_i} \quad (42)$$

Sendo E_i o erro simples de previsão cometido no período i , A_i o dado observado no período i , e F_{t_i} a previsão no período i .

$$EA_i = |E_i| \quad (43)$$

Sendo EA_i o erro absoluto cometido no período i .

$$DMA_n = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n EA_i \quad (44)$$

Sendo DMA_n o desvio médio absoluto no período n .

$$TS_n = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{DMA_n} \quad (45)$$

Sendo TS_n a tendência de viés do período n .

Vários usos da média móvel em previsões relacionadas à hidrologia já foram feitos, dentre os quais pode-se apresentar os trabalhos de Medeiros *et al.* (2018), nos quais foram executadas estimativas de vazões com a ferramenta estatística para 5 e 10 anos, de modo que foi verificado que o comportamento das precipitações observadas seguiu as estimativas calculadas, de modo que as médias móveis de 10 anos mostraram valores mais significativos do que as estimativas para 5 anos.

Na hidrologia a média móvel também é utilizada na determinação das vazões mínimas anuais de 7 dias. Para tanto, deve ser computada a média móvel das vazões mínimas com período de 7 dias ao longo de um ano hidrológico dentro da série de dados (BENETTI; LANNA; COBALCHINI, 2003; VESTENA *et al.*, 2012).

Ao mesmo tempo, a vazão mínima de 7 dias com período de retorno de 10 anos, chamada $7Q_{10}$, é um instrumento relevante na Política Nacional dos Recursos Hídricos do Brasil, pois fornece uma estimativa estatística da disponibilidade hídrica dos escoamentos naturais de água. $7Q_{10}$ pode ser obtida através das médias móveis das vazões diárias com período de 7

dias ao longo de um ano hidrológico, permanecendo retida a menor vazão média (VESTENA *et al.*, 2012).

Nesse sentido, uma série de valores mínimos de vazões médias pode ser obtida em dias consecutivos conforme a repetição do processo de determinação de $7Q_{10}$ para cada ano contido na série histórica (VESTENA *et al.*, 2012).

Segundo Silva Filho e Campos (2021), a média móvel é há muito tempo utilizada como indicador de tendência de valores no mercado financeiro, mas seu uso tem se estendido para outros campos ultimamente, em especial após o emprego da ferramenta estatística em larga escala durante o período da pandemia de COVID-19.

As médias móveis também são ferramentas estatísticas úteis, por exemplo, em previsões sazonais de precipitações (LÚCIO *et al.*, 2010), ou mesmo em previsões de vazões em rios (QUEIROGA; NAGHETTINI; NASCIMENTO, 2005).

2.8 ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Existem testes estatísticos aplicáveis a variáveis hidrológicas largamente utilizados para a análise de tendências. Penereiro e Orlando (2013) fizeram uso do teste de Mann-Kendall para a investigação de possíveis tendências em séries temporais de fatores hidrológicos, como os índices anuais de precipitação, as temperaturas (mínima, média e máxima) e as vazões em rios, registradas nos limites da bacia hidrográfica do Rio Parnaíba, situado na região nordeste do Brasil. Visando-se a identificar com testes estatísticos os pontos de mudança brusca do comportamento hidrológico e climático, o teste de Man-Kendall foi combinado com a prova de Pettit (PENEREIRO; ORLANDO, 2013).

O teste de Mann-Kendall também foi utilizado por Pinheiro, Graciano e Severo (2013) para que pudesse ser detectada a presença de tendências ou a sua ausência nas séries temporais de precipitação diárias, mensais e anuais de 18 postos pluviométricos dispersos pela região Sul do Brasil.

Groppa (2005) empregou uma série de testes estatísticos para a verificação de tendências nas séries temporais de qualidade de água em diversos rios do estado de São Paulo. Dentre os testes usados estão o teste de tendência não sazonal de Mann-Kendall e a prova de Pettit, válida para a revelação de possíveis pontos de ruptura abrupta do comportamento de uma série temporal.

Santos (2016) também se valeu de ambos os testes estatísticos para analisar a bacia do Rio Uberaba, no sentido de identificar possíveis tendências existentes nas séries temporais de variáveis hidrológicas, em conjunto com as alterações no uso e ocupação do solo no alto curso daquela bacia hidrográfica.

O teste de Mann-Kendall também pode ser utilizado em conjunto com o teste de Pettit em casos como, por exemplo: a comparação de resultados de períodos hidrológicos obtidos com metodologias diferentes (SOUSA; ROCHA, 2015); a exploração de séries históricas de vazão (MORTATTI *et al.*, 2004).

Tanto o teste de Mann-Kendall quanto a prova de Pettit são considerados testes não-paramétricos, ou seja, ao contrário dos testes paramétricos, não requerem a especificação do modelo distributivo da população, ficando sua formulação a cargo das características da amostra (ALVES; SOUZA FILHO; SILVEIRA, 2013; NAGHETTINI; PINTO, 2007). Os testes não-paramétricos ainda são mais robustos que os paramétricos, e a opção por um dos dois tipos de ferramenta estatística depende das características do conjunto de dados com que o usuário trabalha (ALVES; SOUZA FILHO; SILVEIRA, 2013; XU; TAKEUCHI; ISHIDAIRA, 2003).

A combinação de ambos os testes permite identificar quando uma possível tendência passou a existir na série (PENEREIRO; ORLANDO, 2013), ao passo que é um procedimento recomendável, tendo em vista seu grande embasamento estatístico para modelos teóricos de descrição climática e hidrológica (PENEREIRO; ORLANDO, 2013; SANSIGOLO; NERY, 2000).

Quanto à sua formulação, o teste de Mann-Kendall está de acordo com a sequência de etapas a seguir: para uma série temporal de observações $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, existe uma hipótese nula, H_0 , segundo a qual na população as variáveis aleatórias são independentes e igualmente

distribuídas (não há tendência evidente), e uma hipótese alternativa, H_1 , para que os dados seguem uma tendência monotônica no tempo (há tendência evidente). Sob H_0 , as equações fundamentais do processo são 46 e 47 (GROPPO, 2005; HIPEL; McLEOD, 1994; MANN, 1945):

$$S = \sum_{k=1}^{n_i-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (46)$$

Sendo S o somatório dos sinais ($\text{sgn}(x)$) das diferenças específicas entre os dados da série, n o número de dados da série, x_j e x_k os dados da série. Nesse contexto, $\text{sgn}(x)$ opera de acordo com a equação 34:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{para } x > 0 \\ 0 & \text{para } x = 0 \\ -1 & \text{para } x < 0 \end{cases} \quad (47)$$

Kendall (1975) demonstrou que S é de distribuição normal, sendo sua média e sua variância representadas pelas equações 48 e 49:

$$E[S_i] = 0 \quad (48)$$

Sendo $E[S_i]$ a média de S .

$$\text{Var}[S] = \frac{n*(n-1)*(2*n+5) - \sum_{j=1}^p t_j*(t_j-1)*(2*t_j+5)}{18} \quad (49)$$

Sendo $\text{Var}[S]$ a variância de S , p o número de grupos de valores iguais na série, e t_j o número de valores iguais contidos no grupo j .

Se $S > 0$, é possível admitir que os dados tendem a crescer na série, ao passo que se $S < 0$, é possível ser admitida uma tendência ao decréscimo. No entanto, para que uma tendência possa ser de fato assumida, é necessário testar a sua existência através do comparativo com uma significância fixada. Para tanto, a ferramenta apresentada na equação 50 deve ser utilizada, de maneira que mesmo em séries com números muito pequenos de dados, é viável

assumir uma distribuição normal, desde que a estatística Z seja determinada pela referida equação (GROPPO, 2005; MANN, 1945; KENDALL, 1975):

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{[Var(S)]}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{[Var(S)]}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (50)$$

Sendo Z a estatística de S , de forma que H_0 deve ser aceita somente se $|Z| \leq Z_{\frac{\alpha}{2}}$, para $F_N\left(Z_{\frac{\alpha}{2}}\right) = \frac{\alpha}{2}$, estando F_N como a distribuição normal cumulativa e α como o nível de significância adotado no teste.

Enquanto isso, o teste de Pettit (PETTIT, 1979) se vale de uma versão do teste de Mann-Whitney, em que é verificado se duas amostras do tipo $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ pertencem à mesma população. Para tanto, a estatística U_t , calculada segundo a equação 51, executa a contagem do número de vezes em que um membro da primeira amostra é maior do que um membro da segunda (GRAPPO, 2005).

$$U_{t,T} = U_{t-1,T} + \sum_{j=1}^T \text{sgn}(Y_t - Y_j) \quad (51)$$

Sendo $U_{t,T}$ a estatística aquela calculada para o dado fixado t (tal que $t=2, \dots, T$), $U_{t-1,T}$ a estatística aquela calculada para o dado fixado $t-1$ (antecessor de t), T o número de sequências de diferenças entre um dado fixado (imutável) e um dado alterável (mutável), Y_t e Y_j o dados da série. Neste ponto é também válida a equação 47 para $\text{sgn}(Y_t - Y_j)$.

Para localizar um possível ponto de ruptura no comportamento da série temporal (*changing point*), a prova de Pettit se utiliza da estatística $k(t)$ como indicador do dito ponto, sendo $k(t)$ o máximo valor de $|U_{t,T}|$, estando a significância dessa estatística conforme a aproximação da equação 52 (GRAPPO, 2005):

$$p \cong 2 * e^{\left\{ \frac{-6 * [k(t)]^2}{(T^2 + T^3)} \right\}} \quad (52)$$

Sendo p a significância do teste de Pettit.

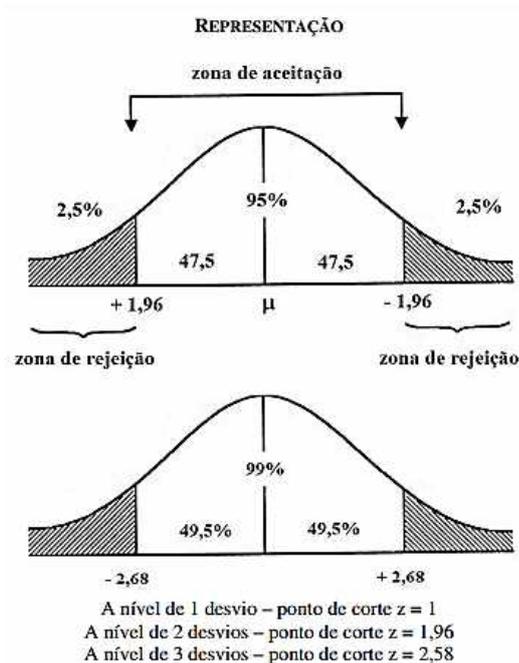
Já Oliveira *et al.* (2008) utilizaram o teste t de *student* em uma análise hidrológica da seguinte forma: foram calculados os impactos gerados pelo uso de vazões naturais (vazões observadas acrescidas das vazões consumidas) em substituição às vazões observadas em estudos hidrológicos na bacia do Rio Paracatu. Então, as médias dos impactos calculados para os diferentes tipos de vazão foram comparadas quanto à significância das diferenças existentes entre si, o que foi feito através do teste t, tendo sido adotada um nível de significância igual a 5% (0,05).

O teste t de *student* ainda encontra fins como: escolha de variáveis explicativas para aplicação em ajustes feitos através de regressão linear (SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010); comparação entre séries temporais de vazão parciais e completas (OLIVEIRA; GONÇALVES, 2022).

Segundo Feijoo (2010), o teste t de *student* pode ser diferenciado entre dois tipos: unicaudal e bicaudal. O primeiro deles posiciona a zona de rejeição à direita ou à esquerda da distribuição, postulando a direção da diferença, enquanto que o segundo, através de H_1 , postula somente a diferença entre as médias, mas não a direção dessa diferença, ou seja, a área de rejeição é dividida entre duas áreas da curva de distribuição.

Feijoo (2010) ainda afirma que existem dois tipos de erro que podem ser cometidos pelo teste t de *student* e por outros testes estatísticos que se utilizam da análise de significância. É possível descartar uma hipótese nula (H_0) verdadeira, com probabilidade igual ao nível de significância adotado, ou aceitar uma hipótese nula falsa. Quanto maior a amostra, menor é a probabilidade de ocorrência de erros (FEIJOO, 2010). A Figura 7 apresenta as zonas de rejeição junto à zona de aceitação dentro da curva para a execução do teste estatístico.

FIGURA 7 - Zonas de aceitação e de rejeição na curva de distribuição



Fonte: Feijoo (2010).

Quanto ao nível de significância, se este for adotado como 0,05 ou 5%, isso significa que se consideram 5 chances em 100 de comprovar H_1 erroneamente e 95 chances em 100 de comprovar H_0 erroneamente (FEIJOO, 2010).

No caso da comparação entre médias de conjuntos amostrais não pareados, o teste t de *student* se divide entre as pressuposições de variâncias supostamente iguais (hipótese nula) e variâncias supostamente diferentes, de modo que a hipótese nula possa ser verificada através do teste f, que analisa, a partir de um nível de significância adotado, a razão entre variâncias. A título de exemplo, se $F_{0,05}=3,25$, para $\alpha = 0,05$, razões menores ou iguais a 3,25 serão consideradas casuais, enquanto que as superiores a esse valor indicarão uma probabilidade de casualidade inferior a 0,05, o que descartará a hipótese nula (CALLEGARI-JACQUES, 2007).

3 ÁREA DE ESTUDO

3.1 DADOS BÁSICOS DA BACIA DO RIO GRANDE

No cenário das bacias hidrográficas da região Sudeste do Brasil, encontra destaque a bacia hidrográfica do Rio Grande, ou BHRG, segundo o IPT (2008), localizada na divisa entre os estados de Minas Gerais e São Paulo, com área total de drenagem igual a 143437,79 km², estando 39,80% (57092,36 km²) em São Paulo e 60,20% (86345,43 km²) em Minas Gerais. Distribuída por 393 municípios, a população abrigada pela bacia era de cerca de 8,6 milhões de pessoas no ano de 2010.

Destaque-se que 325 de todos os municípios englobados estão integralmente inseridos na BHRG. Sendo o Rio Grande o rio principal, seus mais notáveis afluentes são aqueles denominados Sapucaí, Pardo e Turvo (à margem esquerda), das Mortes, Jacaré, Santana, Pouso Alegre, Uberaba e Verde ou Feio (rios estaduais à margem direita). Concomitantemente, à margem esquerda, encontram-se como os mais consideráveis tributários os rios federais Capivari, Sapucaí-Mirim e Mogi-Guaçu, bem como o rio estadual Verde (IPT, 2008).

Quanto ao Rio Grande, sabe-se que este dota-se de nascente na Serra da Mantiqueira, em região próxima ao limite entre os estados de São Paulo de Minas Gerais, a uma altitude aproximada de 1500 m e sob as coordenadas 22° 15' S 44° 34' W (CASTRO *et al.*, 2004). O corpo hídrico apresenta ainda uma extensão de 1050 km, desaguando no Rio Paraná (ZIESLER; ARDIZZONE, 1979, tradução nossa¹).

Ao mesmo tempo, no curso médio, existem afluentes que passam por terrenos basálticos da Formação Serra Geral (Grupo São Bento), presente e próxima ao Rio Grande na parte ocidental do estado de São Paulo e no Triângulo Mineiro (FERNANDES; COIMBRA, 2000).

De acordo com Alvarenga, Silva e Nunes (1997), o Planalto Central do Paraná ocupa as superfícies internas da bacia do Rio Paraná, onde desagua o Rio Grande, e apresenta um

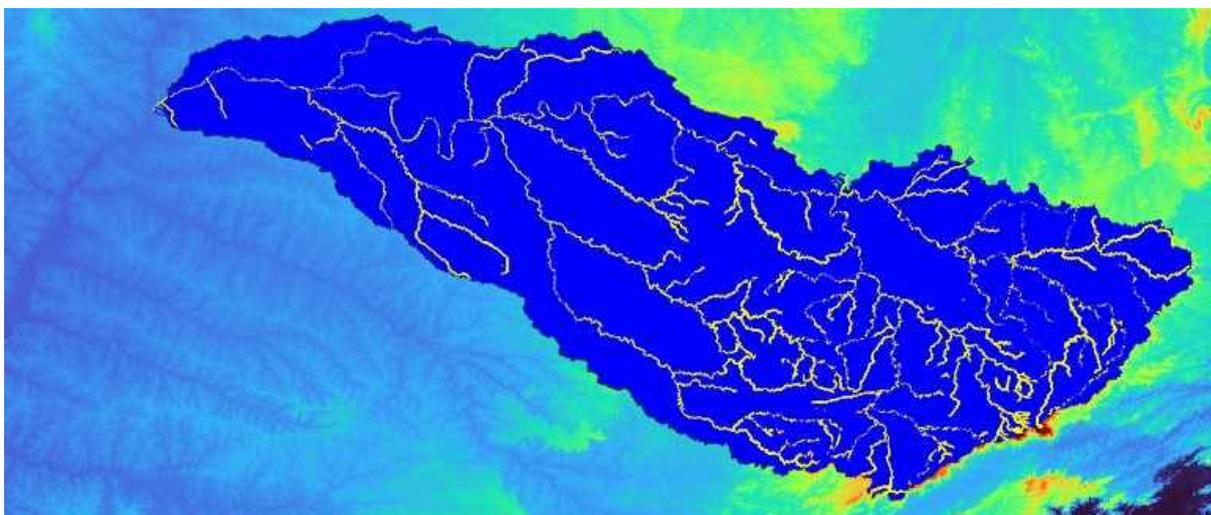
¹ No original: “*Largo total: 1050 km (...) Descargos en: Río Paraná*”

decaimento em direção à calha do Rio Paraná, no eixo da bacia sedimentar cretácica, justamente por relação com o mergulho das camadas geológicas.

Os mesmos autores pontuam que o dito planalto se esculptura em litologias do período cretáceo (efusivas básicas, arenitos intertrapeados e diques de diabásio), das formações Serra Geral e Bauru, e também em litologias mais antigas, tais como os arenitos Furnas Aquidauana e Botucatu, de modo que este compartimento possui uma grande superfície dissecada, onde são majoritárias as formas tubulares amplas e bem conservadas, além de formas convexas de dissecação, relacionadas aos interflúvios (divisores) e vales principais (ALVARENGA; SILVA; NUNES, 1997).

Neste cenário, conste que na bacia do Rio Paraná, devido ao intenso vulcanismo, existem muitas rochas vulcânicas, sobretudo relacionadas aos derrames basálticos, ocorrendo com menos frequência rochas intrusivas e alcalinas, de maneira que ao conjunto de pequenas lentes e camadas de arenitos que podem intercalar-se aos derrames dá-se justamente o nome de Formação Serra Geral (PETRI; FÚLFARO, 1983). Diante deste cenário, a Figura 8 vem a tratar da localização geográfica da bacia do Rio Grande, trazendo imagens puramente ilustrativas, com a camada *raster* do modelo digital de elevação (em coordenadas geográficas EPSG: 4674) e com o *shapefile* dos rios da bacia do Rio Grande (em coordenadas geográficas EPSG: 4674).

FIGURA 8 - Delimitação da bacia do Rio Grande com rios explicitados



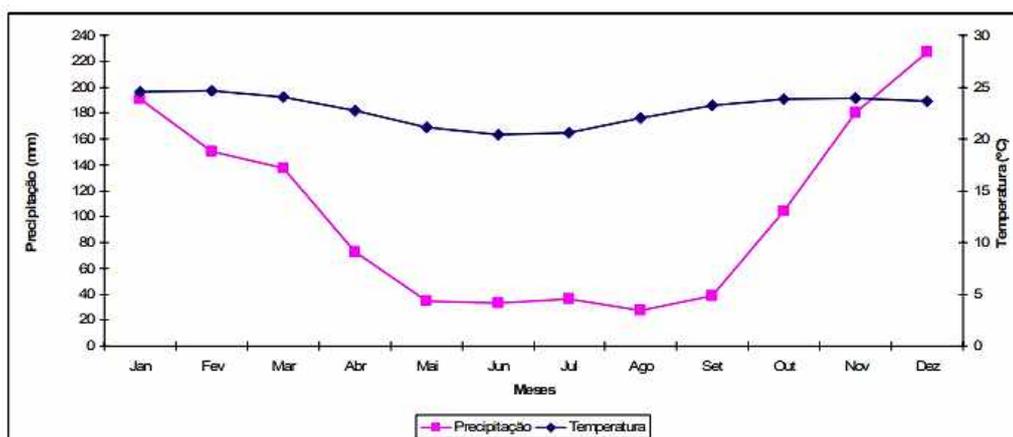
Fonte: O autor (2023).

3.2 CLIMA DA BACIA DO RIO GRANDE

O clima do município de Uberaba é considerado como do tipo A_w , um clima tropical úmido de savana, de forma que a época mais seca do ano coincida com o inverno, e a mais úmida com o verão (SÁ JUNIOR, 2009).

Essa condição se repete para os municípios de Ribeirão Preto, Franca e São José do Rio Preto, também localizados na bacia do Rio Grande (NASCIMENTO; NERY, 2005; CYRÍACO, 2012; FERNANDES, 2016). O Gráfico 3 apresenta a variação típica de temperatura e precipitação deste clima ao longo do ano.

GRÁFICO 3 - Variação da temperatura e da precipitação ao longo de ano no clima A_w



Fonte: Sá Júnior (2009).

3.3 BIOMAS DA BACIA DO RIO GRANDE

A bacia do Rio Grande abrange áreas cujos biomas são a Mata Atlântica e o Cerrado (FERREIRA *et al.*, 2007). Para a Mata Atlântica, a floresta estacional semidecidual é dominante na bacia do Rio Grande no norte e no oeste de São Paulo, vindo a aparecer em menor escala em outras partes do mesmo estado e de Minas Gerais em áreas situadas mais ao leste da bacia (IBGE, 2008).

A floresta ombrófila densa possui pouca influência, estando mais próxima também ao leste da bacia, assim como a savana e a floresta ombrófila mista, que aparecem em porções ainda

menores. Finalmente, as áreas de tensão são expressivas no oeste de São Paulo e no leste da bacia do Rio Grande, mais precisamente no sul do estado de Minas Gerais (IBGE, 2008).

Já para o Cerrado, tanto as composições de vegetação onde predominam as árvores quanto aquelas onde predominam as ervas são normalmente heliófilas, desenvolvendo-se bem sob intensa luminosidade solar (MIRANDA, 2021).

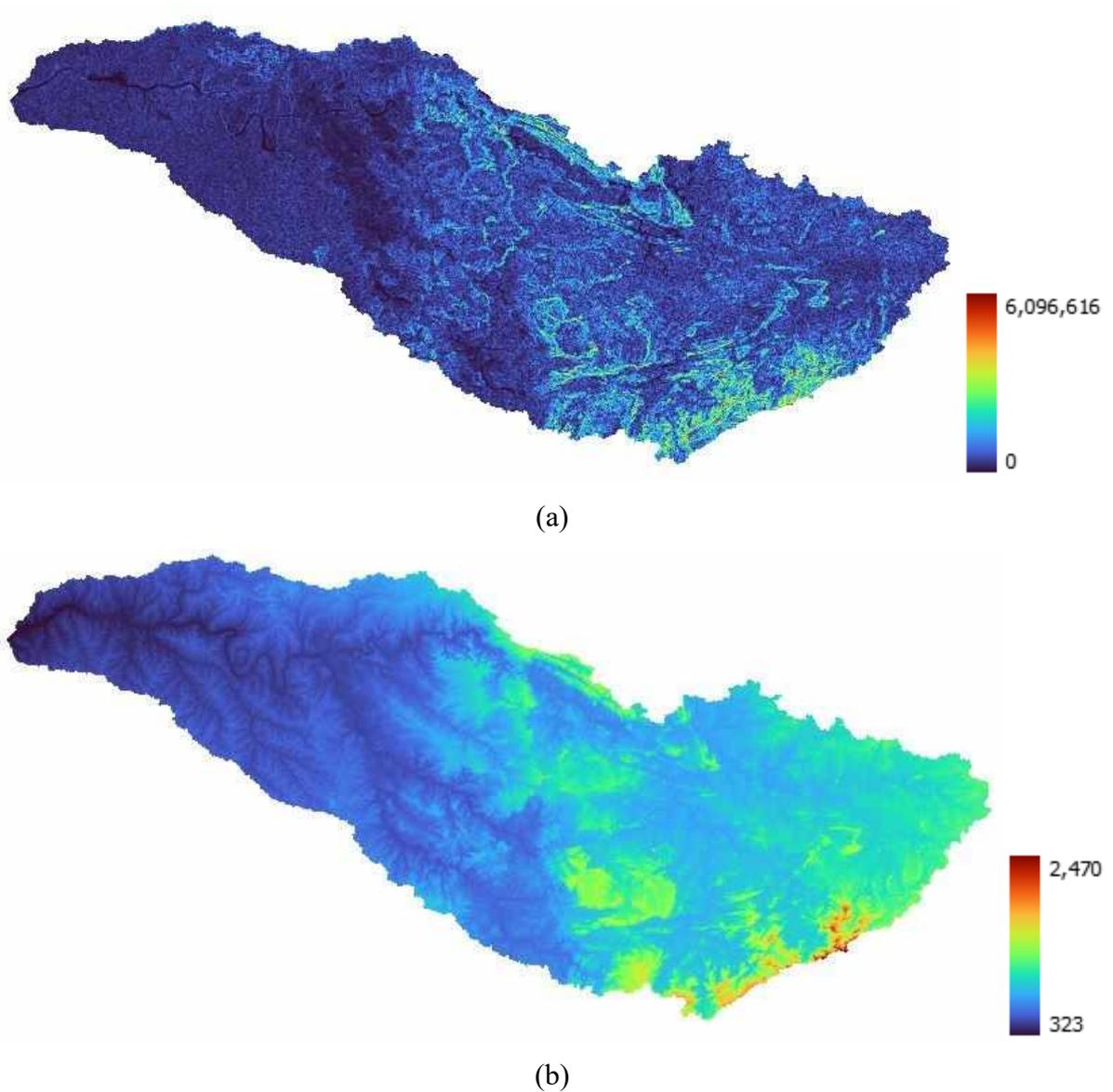
O estrato herbáceo do bioma não é formado por espécies de sombra, as ombrófilas, dependentes do estrato lenhoso, como nas florestas, pois o sombreamento lhe é danoso ao desenvolvimento, já que o adensamento da vegetação lenhosa elimina notavelmente o estrato herbáceo (MIRANDA, 2021).

3.4 RELEVO DA BACIA DO RIO GRANDE

O relevo da bacia do Rio Grande é fortemente composto por planaltos, que abrangem desde a região nordeste de São Paulo, passando por todo o norte do estado e chegando a seu oeste. Ao sul dos planaltos, ainda em São Paulo, existem áreas menores de patamares e de depressões, sendo observáveis também pontos específicos de planícies a sul e a oeste dos próprios planaltos (IBGE, 2006a).

No Triângulo Mineiro, a bacia engloba predominantemente regiões de planaltos, com pequenas áreas de patamares e de chapadas. Ao sul de Minas Gerais há uma maior distribuição entre os compartimentos de planaltos, patamares, depressões e serras (IBGE, 2006a). A Figura 9 mostra essas características, apresentando em porcentagem as declividades do terreno e em metros a sua elevação. Ambas as imagens são provenientes de camadas *raster* com a projeção EPSG: 31982.

FIGURA 9 - Relevo da bacia do Rio Grande com (a) declividades e (b) elevação



Fonte: O autor (2023).

3.5 SOLOS DA BACIA DO RIO GRANDE

Na bacia do Rio Grande predominam os solos dos tipos latossolo (na maior parte do nordeste de São Paulo, no Triângulo Mineiro e em grande parte do sul de Minas Gerais) e argissolo (especialmente no norte e no oeste de São Paulo). Há pequenas e pontuais áreas de organossolo no nordeste, no norte e no centro de São Paulo, bem como no Triângulo Mineiro (IBGE, 2006b).

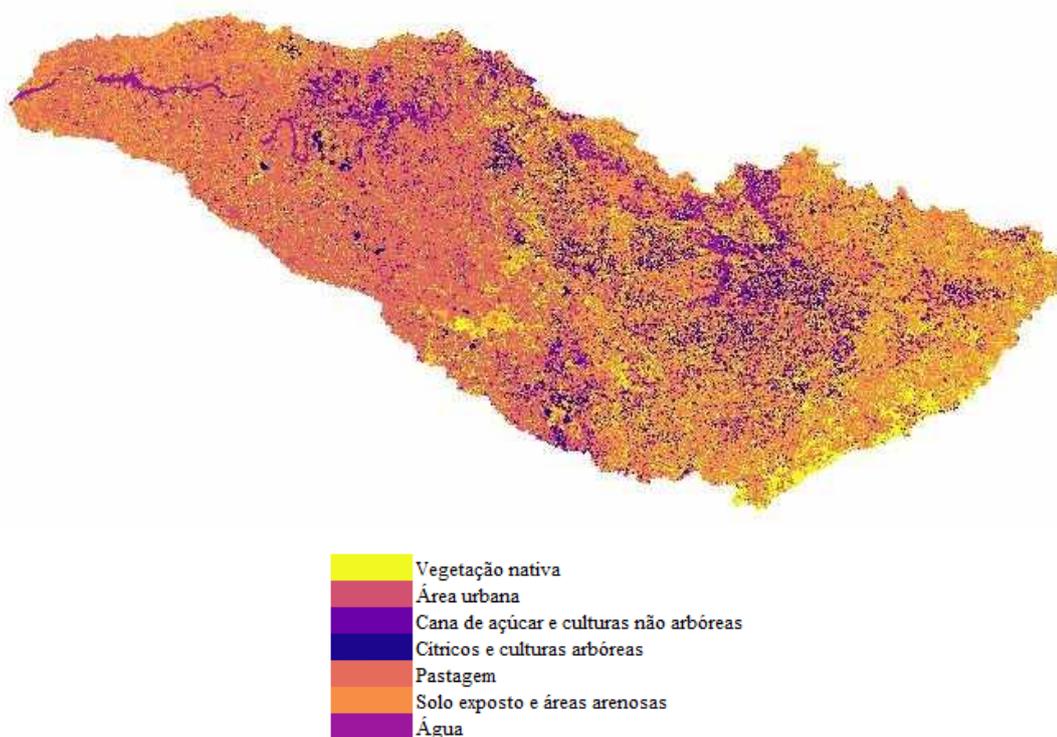
No Sul de Minas Gerais ocorrem, além do latossolo, o argissolo, o neossolo e o vertissolo (estes dois últimos em menor escala), de modo que o neossolo também está presente no nordeste de São Paulo e, em menores porções, no centro do mesmo estado (IBGE, 2006b).

3.6 USO DO SOLO NA BACIA DO RIO GRANDE

Na região da bacia hidrográfica do Rio Grande contida no estado de São Paulo, predominam as áreas agrícolas, com algumas porções de pastagem com manejo no noroeste da unidade da federação (IBGE, 2018).

No Triângulo Mineiro, prevalecem as mesmas pastagens a oeste e as áreas agrícolas a leste, ao passo que no sul de Minas Gerais existe uma boa divisão entre mosaicos de ocupações em áreas florestais, pastagens com manejo e áreas agrícolas (IBGE, 2018). A Figura 10 apresenta um mapa da bacia com as demarcações de uso e ocupação do solo no ano de 2022. A imagem é uma composição de camadas *raster* das partes da bacia pertencentes aos estados de São Paulo e Minas Gerais, ambas sob a projeção EPSG: 4674.

FIGURA 10 - Uso e ocupação do solo na bacia do Rio Grande



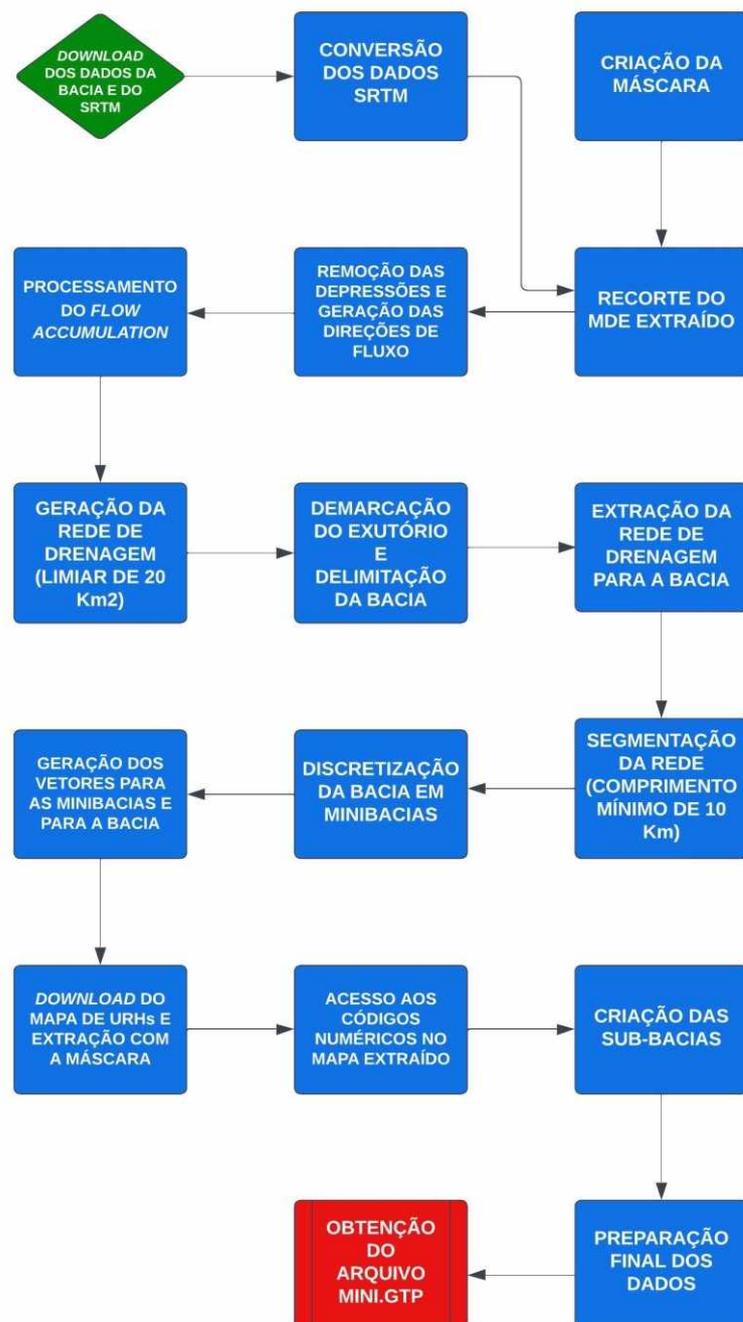
Fonte: Adaptado de MapBiomas (2022).

4 MÉTODOS

4.1 PRÉ-PROCESSAMENTO NO IPH-HYDRO TOOLS

A Figura 11 apresenta um fluxograma que resume a fase de pré-processamento.

FIGURA 11 - Fluxograma da etapa de pré-processamento no IPH-Hydro Tools



Fonte: O autor (2023).

A etapa de pré-processamento, que utiliza a ferramenta *IPH-Hydro Tools*, foi concluída e gerou como resultado preliminar o arquivo *MINI.GTP*, que será explicado em breve. Em termos gerais, esta fase consistiu em uma sequência de ações que se iniciou pelo *download* dos dados *SRTM*, feito do sistema *Google Engine Explorer*, em formato *TIF*, com resolução igual a 90 metros pelo sistema *Google Earth Engine*, que se fundamenta nos dados oferecidos pelo *Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)* (*GOOGLE EARTH ENGINE*, 2022; *INEGI*, 2022), e do arquivo *shapefile* da bacia hidrográfica no catálogo da *ANA* (*ANA*, 2014).

Em seguida, os três *TIFs* obtidos foram mesclados e convertidos para o formato *ASC* trabalhável no dispositivo. As funções *OpenStreetMap* e *Google.cn Satellite* foram habilitadas para que se tivessem referências geográficas durante o processamento dos dados nesta etapa. Desse modo, permitiu-se que uma camada vetorial denominada *Máscara* fosse criada a fim de delinear razoavelmente os limites da bacia do Rio Grande. Assim um *Modelo Digital de Elevação (MDE)* foi extraído da camada *raster ASC*, usando-se o contorno da *Máscara*.

Logo, a preparação do *MDE* para o processamento começou com a remoção das depressões, que poderiam motivar problemas quando da geração das redes de drenagem e do cálculo das direções de fluxo. Foi então criado o arquivo *Flow Accumulation*, que por sua vez foi utilizado para que se construísse uma rede de drenagem com o limiar de área de 20 km², considerando esta uma definição aceitável. Isso permitiu que o exutório da bacia fosse demarcado sobre a confluência do Rio Grande com o Rio Paraná, e que a bacia fosse delimitada pelo *IPH-Hydro Tools*.

Tendo-se a área da bacia desenhada, a rede de drenagem foi extraída para seus limites e segmentada sob o comprimento mínimo estabelecido de 10 km. A discretização da área foi feita em minibacias, e duas camadas vetoriais foram produzidas: uma delas para o conjunto de minibacias e a outra para a bacia completa.

Um mapa de *URHs* foi baixado do sistema do grupo de estudos *HIDROLOGIA DE GRANDE ESCALA (HGE)*, vinculado ao *IPH* (*HGE*, 2015), e um setor lhe foi extraído com o uso do contorno da camada *Máscara*. Então, os códigos numéricos contidos no mapa foram acessados através da ferramenta de identificação do *QGIS*. A função desses códigos será apresentada na próxima seção.

Em seguimento, a bacia hidrográfica foi dividida em duas sub-bacias, sendo um exutório estabelecido sobre a rede de drenagem do Rio Grande, próximo à barragem de Volta Grande, e um segundo ponto colocado exatamente sobre o exutório já demarcado para a bacia. Essa discretização visa a uma melhor possibilidade de calibração do modelo, caso seja necessária uma distribuição longínqua dos postos fluviométricos, tendo em vista que as estações poderão estar situadas em regiões muito distintas caso isso ocorra. O procedimento adotado para que as sub-bacias fossem delimitadas foi muito parecido com aquele respeitado para que a área da bacia fosse delineada, com a diferença de se terem dois exutório em vez de apenas um. Essa divisão pretendeu colaborar com a distribuição dos parâmetros do modelo.

Por último, na ferramenta *MGB Processing*, os dados do Rio Grande foram adicionados, e após a preparação dessas informações, o processamento junto aos dados de SIG, organizados nas ações anteriores a esta, foi feito, produzindo o arquivo MINI.GTP, que contém informações como os centroides das minibacias, assinalados de acordo com as coordenadas de latitude e longitude, de modo a situá-las geograficamente, as áreas de drenagem a montante das mesmas minibacias, a largura e a profundidade do canal em cada um dos trechos de rio, entre outros. Esse arquivo é utilizado como fonte de dados de entrada primordial nas demais etapas da metodologia seguida para a aplicação do modelo MGB.

Existem algumas considerações a serem feitas sobre o pré-processamento executado. A primeira delas é que a ferramenta em uso não pôde delimitar toda a área da bacia com perfeita precisão. Houve falhas no cobrimento da região leste da unidade hidrológica. A versão utilizada no processamento foi a melhor conseguida após várias tentativas de delineamento.

Quanto às opções hidráulicas do rio, mantiveram-se os valores automaticamente sugeridos pelo instrumento *MGB-Processing* na aba *River Hydraulic Options* da janela do dispositivo, considerando-os razoáveis: o declive máximo foi fixado em 100 m/km; o declive mínimo foi fixado em 0,01 m/km; o coeficiente de Manning foi fixado em 0,030, valor normal adotado para rios e córregos limpos, de margens retas e sem trechos de alta turbulência no curso da água, ou rios de planalto (BERNIS, 2003, tradução nossa²).

² No original: “Cauces naturales (ríos y arroyos) (...) Limpios, de riberas rectas, sin ollas (ríos de meseta) (...) 0’030”

Já quanto aos cálculos dos parâmetros dos rios, tomando-se como referência a área de drenagem no quesito das relações geomórficas, o procedimento padrão é o que está descrito no Anexo A.

Contudo, devido à falta de viabilidade de se executarem medições de sucessivos perfis transversais no Rio Grande, o procedimento padrão não foi utilizado, tendo sido então adotados os valores sugeridos pelo próprio IPH-*Hydro Tools*, na aba *Bankfull Geomorphic Relationships* da ferramenta MGB-*Processing*, que são tão somente: $a=0,95$; $b=0,5$; $c=1,03$; $d=0,3$. Tais valores são parâmetros das relações geométricas, de modo que a e b desempenhem o papel de relacionar a largura do canal à área de drenagem, enquanto que c e d relacionam a profundidade do canal à referida área.

Finalmente, sobre o mapa de URHs, a Tabela 6 especifica o significado de seus códigos numéricos.

Tabela 6. Códigos numéricos do mapa de URHs e seus significados.

Código	Bloco	Descrição
1	FlorRas	Floresta em solo raso
2	FlorProf	Floresta em solo profundo
3	AgriRas	Agricultura em solo raso
4	AgriProf	Agricultura em solo profundo
5	CampRas	Campo em solo raso
6	CampProf	Campo em solo profundo
7	Varzea	Várzeas e Florestas Inundáveis
8	ASI	Áreas Semi-Impermeáveis
9	Água	Água

Fonte: Adaptado de HGE (2015).

Os créditos para a execução desta seção devem ser justamente atribuídos ao acompanhamento das instruções dadas pelo grupo de pesquisa HGE (MEYER; FAN, 2020a), bem como ao roteiro de uso do programa (JARDIM *et al.*, 2014; IPH, 2020b).

4.2 PROCESSAMENTO NO MGB-IPH

A Figura 12, por sua vez, resume esta etapa.

4.2.1 Dados hidrológicos empregados

Esta etapa se iniciou pela importação para um novo projeto dos arquivos correspondentes ao vetor gerado para as minibacias de discretização e pelo registro das URHs, com as características da superfície terrestre em termos de vegetação e solo, acompanhadas de seus códigos, tal qual descrito na Tabela 6.

O *download* dos dados de precipitação e vazão para a bacia, ou seja, dos postos pluviométricos e fluviométricos no período definido, veio em seguida, para que a precipitação pudesse então ser interpolada de maneira inversamente proporcional ao quadrado da distância, gerando estimativas de valores para toda a área da bacia, o que produziu o arquivo de dados de precipitação. Devido a limitações computacionais, esta operação se mostrou um tanto morosa.

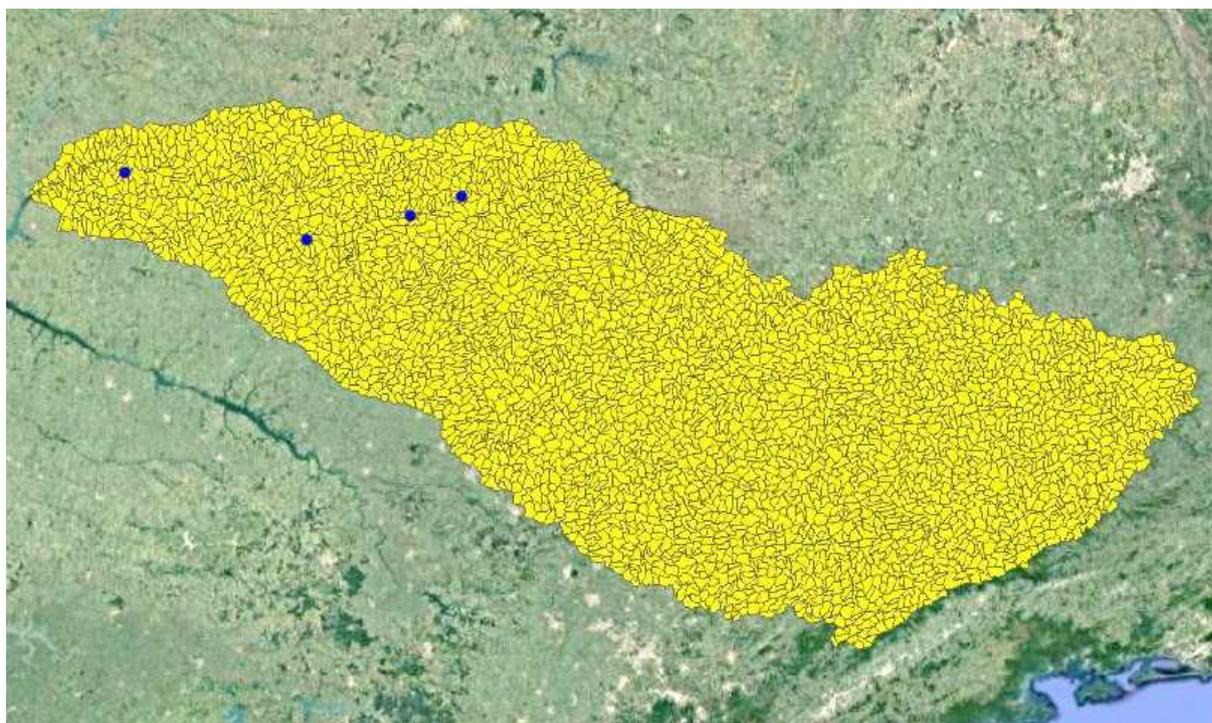
A partir de então, os códigos numéricos das estações fluviométricas foram compatibilizados com os códigos das minibacias, pois a numeração contida no vetor gerado a partir do MINI.GTP não era a mesma do *shapefile* produzido pelo programa para as minibacias. Assim foi construído o arquivo dos dados de vazão observada. Feito isso, os postos pluviométricos a serem empregados por estarem inseridos na bacia foram selecionados, gerando o arquivo de dados de clima.

A respeito desse primeiro conjunto de ações, vale ressaltar o seguinte: o período de 01/01/1990 a 29/06/2015 foi dado como aquele em que se deseja executar a simulação, por ter sido constatado como um intervalo com razoável monitoramento dos dados de precipitação e no qual os postos fluviométricos possuem completude de dados para serem usados na calibração.

Conferidos no QGIS os limites em coordenadas da bacia para topo e fundo (norte e sul para latitude) e para esquerda e direita (oeste e leste para a longitude), os seguintes números foram respectivamente constatados: -19,19; -23,11; -51,16; -44,52. Porém, como a área compreendida entre tais coordenadas compreende mais de 500 medidores, foi necessária uma pequena redução da mesma, passando-se para os limites: -20; -21; -49; -47.

Essa foi uma pequena limitação encontrada no processo. Ademais, os dados de vazão foram baixados a partir do acesso a postos fluviométricos do Rio Grande pelo sistema HIDROWEB v3.2.7 (ANA, 2022). No total 4 estações foram escolhidas por apresentarem dados completos no período determinado, sendo seus códigos 61760080, 61796080, 61941080 e 61998080, mostrados na devida ordem de leste para oeste, conforme o sentido do rio, de acordo com a Figura 13, meramente ilustrativa, composta pela camada *raster* do mapa *Google.cn Sattelite* (em coordenadas geográficas EPSG: 3857), superposta pelo vetor dos rios da bacia (em coordenadas geográficas EPSG: 4674), tendo sido destacado em amarelo o traçado do Rio Grande, e pelo vetor dos postos fluviométricos escolhidos (sem um sistema de referência de coordenadas definido).

FIGURA 13 - Postos fluviométricos selecionados



Fonte: O autor (2023).

As coordenadas dos postos são as seguintes: latitude -20,02 e longitude -48,23 para 61760080 (município de Conceição das Alagoas-MG), latitude -20,13 e longitude -48,55 para 61796080 (município de Planura-MG), latitude -20,29 e longitude -49,20 para 61941080 (município de Fronteira-MG), e latitude -19,87 e longitude -50,35 para 61998080 (município de Ouroeste-SP).

4.2.2 Definição dos parâmetros de solo

Em seguida, os parâmetros de vegetação foram declarados, junto à inserção do MINI.GTP e das classes de resposta hidrológica (HRCs) das URHs, fazendo com que o *plug-in* produzisse o arquivo de dados de vegetação. A priori isso foi feito com os dados padrão presentes na literatura do IPH (IPH, 2020b), e adotando-se a simplificação de parâmetros iguais para todos os meses do ano.

É válido colocar que os parâmetros de solo se dividem em 2 tipos básicos: variáveis, que mudam ao longo da extensão da bacia, e fixos, constantes por toda essa extensão. Os parâmetros variáveis são os seguintes: W_m (capacidade máxima de armazenamento de água no solo); b (parâmetro da relação de armazenamento e saturação de água no solo); K_{bas} (parâmetro de escoamento subterrâneo); K_{int} (parâmetro de drenagem superficial); XL (dado que controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou da subsuperfície do solo); CAP (dado controlador do fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial do solo ao longo do tempo); W_c (parâmetro de armazenamento residual).

Já os constantes são: C_s (parâmetro para a calibração da propagação superficial nas células); C_i (parâmetro para a calibração da propagação subsuperficial nas células); C_b (parâmetro de atraso do reservatório subterrâneo); Q_b (condição inicial para o modelo, que não reflete exatamente a condição de um parâmetro).

Sendo assim, todos os arquivos criados nesta etapa foram imbuídos, junto ao MINI.GTP e à planilha de dados das HRCs, na elaboração do primeiro projeto de simulação (pela ferramenta *Create/Edit Simulation Project*), que consiste na reunião de todos esses dados preparados pelo processamento no *plug-in* do MGB.

Portanto, depois da declaração dessas informações, a primeira simulação foi corrida (na ferramenta *Run Simulation*), aplicando-se o modelo inercial e a opção de calibração manual, que manteve os parâmetros de solo inalterados. Obtiveram-se então os primeiros gráficos e especialmente os primeiros hidrogramas, ainda não calibrados, para que se verificassem os valores das funções objetivo (NASH, NASLOG e PBIAS).

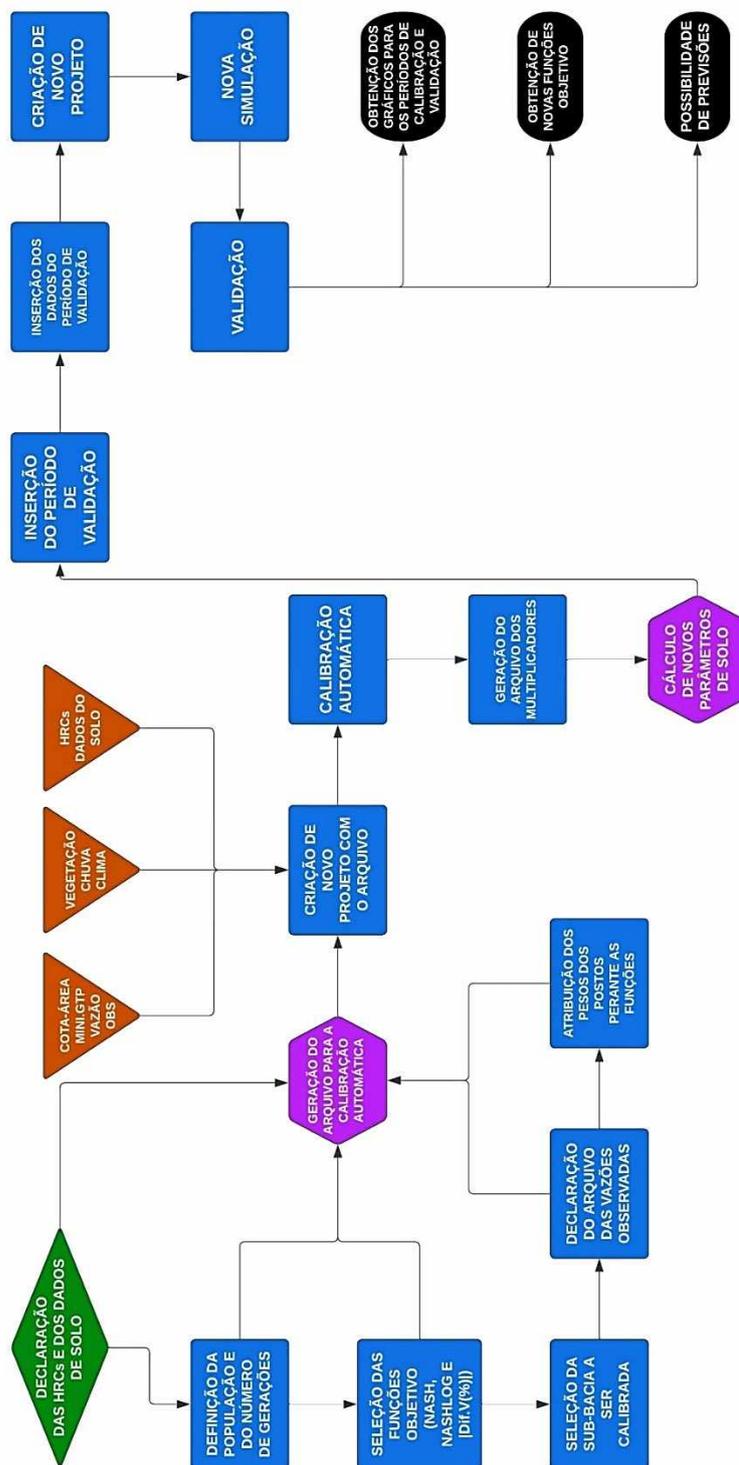
A título de esclarecimento, os resultados a que se tem acesso após o processamento são: a comparação entre os hidrogramas das vazões simuladas e observadas; a comparação entre as curvas de permanência para dados simulados e observados; a visualização exclusiva dos hidrogramas calculados; a visualização exclusiva das curvas de permanência; o gráfico da série temporal dos níveis de água simulados; o gráfico da série temporal para área inundada; o mapa de inundação, produzido com o pós-processamento de inundação. Os três últimos itens apenas são acessíveis para simulações executadas com o modelo inercial.

Todas essas informações sobre os parâmetros e sobre esta etapa constam nas instruções de uso oferecidas por professores e profissionais do grupo de pesquisa HGE (MEYER; FAN, 2020b), e também na própria interface da ferramenta do *plug-in* MGB, que é responsável por explicitar as unidades de alguns dos parâmetros.

4.3 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

A Figura 14 vem a resumir esta etapa dentro do contexto apresentado.

FIGURA 14 - Fluxograma da etapa de calibração e validação do modelo



Fonte: O autor (2023).

Optou-se neste trabalho pelo modo de calibração automática do MGB. Para tanto, as referências tomadas foram as instruções disponibilizadas pelo grupo HGE e pela literatura do IPH (FAN, 2020; IPH, 2017).

Informações complementares sobre o modelo, tais como algumas de suas aplicações acadêmicas e seu código-fonte (Fortran) podem ser encontradas ao se acompanhar a íntegra do roteiro de uso oferecido por professores e profissionais do grupo de pesquisa HGE (FAN; MEYER; GAMA, 2020; GAMA; FAN, 2020; HIDROLOGIA GRANDE ESCALA, 2020a; HIDROLOGIA GRANDE ESCALA, 2020b; COLLISCHONN; FAN, 2020; HIDROLOGIA GRANDE ESCALA, 2021). Ademais, a literatura produzida pelo IPH também dispõe de mais dados a respeito do mesmo modelo (IPH, 2020c; IPH, 2020d).

A etapa de calibração foi executada neste trabalho, e teve seu começo na declaração das HRCs e dos dados de solo na ferramenta de preparação dos dados para a calibração automática (*Automatic calibration parameters*). Na mesma janela foram também definidos os valores de iteração do processamento, sendo estes o número de indivíduos na população e a quantidade máxima de gerações permitidas para que o modelo buscasse a melhor solução possível.

As funções objetivo também foram escolhidas, habilitando-se 3 das 4 possibilidades oferecidas pelo MGB. Isso aconteceu, pois o dispositivo não permite a seleção de todas as opções ao mesmo tempo. No caso, as alternativas fornecidas são o coeficiente de Nash-Sutcliffe, o coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos, o módulo do erro percentual e volume e o erro percentual do cálculo da vazão Q_{90} , sendo as três primeiras as que foram escolhidas para o cálculo da calibração.

Como esse cálculo trabalha com a minimização das funções, foram usados os valores de 1-NASH e 1-NASHLOG, de maneira que, quanto melhores os resultados, mais próximos a zero estariam 1-NASH e 1-NASHLOG. Esse mesmo cenário não foi necessário ao módulo do erro de volume que, por se tratar de uma função modular, inevitavelmente tende ao valor zero, seu mínimo, quanto maior a qualidade dos resultados.

Este procedimento foi feito para cada uma das duas sub-bacias, separadamente, evitando que se descaracterizasse a divisão anteriormente feita para que a distribuição dos parâmetros tivesse uma melhor qualidade. Logo, definiu-se para qual sub-bacia era efetuado o processamento. Então, precisou-se declarar o arquivo das vazões observadas, para que fosse feita a atribuição de pesos aos postos perante as funções.

É válido destacar que os pesos não são relativos às funções, mas sim às estações de medição de vazão. As estações com menos confiabilidade receberam pesos menores, enquanto aquelas consideradas mais credíveis tiveram valores mais altos, buscando um equilíbrio para os dados calculados. Após isso, um arquivo de parâmetros de solo para serem calibrados foi criado.

Então, um novo projeto, similar ao que fora gerado para a primeira simulação, foi produzido na ferramenta *Create/Edit Simulation Project*, porém agora contando com o arquivo dos dados de solo recém-gerado, além de todas as outras informações de base: arquivo cota-área, MINI.GTP, vazões observadas, dados de vegetação, de precipitação e de clima, HRCs e parâmetros do solo.

A calibração foi feita na ferramenta de simulações, *Run Simulation*, onde o projeto foi selecionado como entrada, junto ao período definido para a calibração. Neste caso, ao invés de se optar pelo modelo inercial, a escolha para o trabalho foi Muskingum-Cunge, pois este confere um processamento muito mais rápido dos dados. Também foi tomada a calibração automática, e não mais a manual, como outrora. Fatalmente a calibração automática produziu um arquivo TXT com multiplicadores para os parâmetros do solo.

Esse documento contém todas as gerações de cálculo representadas por tabelas de multiplicadores que traçam correspondências entre os parâmetros de solo e as HRCs, já que um mesmo parâmetro é mutável de acordo com a HRC a que se associa. Dessa forma, os multiplicadores foram utilizados para que novos parâmetros de solo fossem calculados, ou seja, para que se obtivessem os parâmetros efetivamente calibrados. Com esses parâmetros, fizeram-se novos gráficos e hidrogramas para o período de calibração.

Vale mencionar que foram mantidos 100 indivíduos por população para um limite máximo de 500 gerações do algoritmo de calibração, evitando que o processo se alongasse demasiadamente e também que houvesse poucas iterações possíveis para a obtenção de resultados coerentes.

4.4 PROPOSTAS DE MÉTRICAS DE DESEMPENHO

4.4.1 Estimativa de derivadas

Pode-se considerar um hidrograma como um conjunto de pontos de coordenadas $(x; y)$, tal que os pontos adjacentes estejam interligados entre si através de segmentos de reta. Assim, sabe-se que é matematicamente possível perpassar todos os pontos de um hidrograma com polinômios. Entretanto, a prática de tal procedimento pode ser inviável, dada a grande quantidade de pontos componentes de um hidrograma e o risco de ocorrência do problema de *overfitting*, caracterizado pelo ótimo ajuste de um modelo aos dados já existentes, que se opõe à má qualidade das previsões feitas através do mesmo modelo para os dados não registrados (XUE, 2019; BARTLETT *et al.*, 2020). O *overfitting* se dá em função da presença de ruídos na série de dados, ao tamanho limitado do conjunto disponível para treinamento e à complexidade dos fatores classificadores (XUE, 2019; BARTLETT *et al.*, 2020).

Portanto, para que não seja necessária a determinação de polinômios de ajuste aos hidrogramas, faz-se interessante a estimativa de derivadas, sendo esta uma ferramenta que permite cálculos diretos a partir dos valores presentes nos próprios hidrogramas, de modo a se obterem resultados diretos sobre a variação das vazões ao longo do tempo. Para tanto, deve-se considerar que o hidrograma é composto por dados de tempo (datas) no eixo x e por dados de vazão no eixo y , estando as datas separadas entre si por um passo temporal constante.

Logo, tomando-se h como um passo constante existente entre as coordenadas x de cada ponto, o coeficiente angular da reta secante passante pelo ponto i e por seu antecessor, $i-1$ é tal como demonstra a equação 53:

$$S_{ant} = \frac{y_i - y_{i-1}}{h} \quad (53)$$

Sendo S_{ant} o coeficiente angular da reta passante pelo ponto $i-1$ e pelo ponto i , y_i a coordenada y do ponto i , e y_{i-1} a coordenada y do ponto $i-1$.

De modo análogo, a equação 54 calcula o coeficiente angular da secante passante por i e por seu sucessor, $i+1$.

$$S_{suc} = \frac{y_{i+1} - y_i}{h} \quad (54)$$

Sendo S_{suc} o coeficiente angular da reta passante pelo ponto i e pelo ponto $i+1$, e y_{i+1} a coordenada y do ponto $i+1$.

Portanto, considerando a média entre ambos os coeficientes angulares como uma estimativa razoável para a derivada no ponto i , chega-se à equação 55:

$$D_{esti} = \frac{1}{2} * \left(\frac{y_i - y_{i-1}}{h} + \frac{y_{i+1} - y_i}{h} \right) = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2 * h} \quad (55)$$

Sendo D_{esti} a derivada estimada no ponto i .

No entanto, esta equação é apenas válida para os pontos que possuem ao menos um antecessor e um sucessor no conjunto. Portanto, é preciso fazer outras considerações, que envolvam o primeiro e o último ponto da análise. Nesse sentido, para o ponto inicial, que não possui antecessores, a derivada é estimada somente com a secante do ponto sucessor, ocorrendo com o ponto final a estimativa pela secante do ponto antecessor, conforme as equações 56 e 57:

$$D_{est1} = \frac{y_2 - y_1}{h} \quad (56)$$

Sendo D_{est1} a derivada estimada no primeiro ponto, y_2 a coordenada y no ponto 2, e y_1 a coordenada y no ponto inicial.

$$D_{estN} = \frac{y_N - y_{N-1}}{h} \quad (57)$$

Sendo D_{estN} a derivada estimada no último ponto, y_N a coordenada y no ponto final, e y_{N-1} a coordenada y no ponto anterior ao final.

Exemplos de aplicação das equações deduzidas para a estimativa de derivadas podem ser dados para funções literais do segundo e do terceiro grau, o que se dá nos parágrafos adiante, demonstrando algebricamente o seu funcionamento diante de tais polinômios.

Sobre funções do segundo grau, existe uma consideração relevante a ser feita: independentemente do valor adotado para o passo h , as derivadas estimadas nos pontos internos, isto é, aqueles que não são nem o ponto inicial e nem o final, serão iguais às derivadas reais. A demonstração desse fato se encontra desenvolvida nos parágrafos seguintes, tendo sido uma dedução feita no presente trabalho.

A princípio, é sabido que a derivada de primeira ordem, $f'(x)$, de um polinômio de segundo grau, $f(x)$, representado pela equação 58, é dada pela equação 59:

$$f(x) = a * x^2 + b * x + c \quad (58)$$

$$f'(x) = 2 * a * x + b \quad (59)$$

Concomitantemente, define-se a estimativa da derivada no ponto i tomando x_{i-1} como $x_i - h$ e x_{i+1} como $x_i + h$. Aplicando-se isso à equação 55, conclui-se a equação 60, que imediatamente remonta à equação 59:

$$D_{est_i} = \frac{a*(x_i+h)^2+b*(x_i+h)+c-[a*(x_i-h)^2+b*(x_i-h)+c]}{2*h} = \frac{4*a*x_i*h+2*b*h}{2h} = 2 * a * x_i + b \quad (60)$$

Já para os pontos inicial e final, isso não se repete, e uma dependência do valor de h pode ser verificada. Ao se injetar $x_i - h$ e $x_i + h$ respectivamente nas equações 56 e 57, é possível chegar às equações 61 e 62:

$$D_{est_1} = \frac{a*(x_1+h)^2+b*(x_1+h)+c-[a*x_1^2+b*x_1+c]}{h} = \frac{2*a*x_1*h+a*h^2+b*h}{h} = 2 * a * x_1 + a * h + b \quad (61)$$

$$D_{est_N} = \frac{a*x_N^2+b*x_N+c-[a*(x_N-h)^2+b*(x_N-h)+c]}{h} = \frac{2*a*x_N*h-a*h^2+b*h}{h} = 2 * a * x_N - a * h + b \quad (62)$$

Daí extraem-se as equações 63 e 64, que buscam igualar através das variáveis w_0 e w_f , na devida ordem, as expressões algébricas descobertas à derivada de primeira ordem do polinômio de 2º grau:

$$\lim_{h \rightarrow w_0} 2 * a * x_1 + a * h + b = 2 * a * x_1 + b \quad (63)$$

$$\lim_{h \rightarrow w_f} 2 * a * x_N - a * h + b = 2 * a * x_N + b \quad (64)$$

Sendo w_0 e w_f as variáveis às quais tende h , respectivamente para os pontos inicial e final, para que sejam satisfeitas as equações.

No processo para se resolverem tais equações, substituem-se as variáveis w_0 e w_f , cujos valores são procurados, nas funções dos limites, obtendo-se as equações 65 e 66:

$$2 * a * x_1 + a * w_0 + b = 2 * a * x_1 + b \quad (65)$$

$$2 * a * x_N - a * w_f + b = 2 * a * x_N + b \quad (66)$$

Assim, são obviamente elucidáveis as equações 67 e 68, que se referem às parcelas que contêm as variáveis w_0 e w_f :

$$a * w_0 = 0 \quad (67)$$

$$-a * w_f = 0 \quad (68)$$

Como é necessário que o coeficiente a , que multiplica o termo elevado ao quadrado, deve ser diferente de 0 para que exista um polinômio do 2º grau, finalmente atingem-se as equações 69 e 70:

$$w_0 = 0 \quad (69)$$

$$w_f = 0 \quad (70)$$

Com base nisso, nota-se que a qualidade da estimativa das derivadas do polinômio do 2º grau é tão melhor quanto mais próximo de 0 estiver o passo h .

Sobre o caso de terceiro grau, sabe-se que a derivada de primeira ordem, $g'(x)$, de um polinômio de terceiro grau, $g(x)$, representado pela equação 71, é dada pela equação 72:

$$g(x) = a * x^3 + b * x^2 + c * x + d \quad (71)$$

$$g'(x) = 3 * a * x^2 + 2 * b * x + c \quad (72)$$

Para a derivada estimada no ponto i , x_{i-1} é igual a $x_i - h$, e x_{i+1} igual a $x_i + h$. Aplicando-se isso à equação 55, concluem-se as equações 73a e 73b:

$$D_{est_i} = \frac{a*(x_i+h)^3+b*(x_i+h)^2+c*(x_i+h)+d-[a*(x_i-h)^3+b*(x_i-h)^2+c*(x_i-h)+d]}{2*h} \quad (73a)$$

$$D_{est_i} = \frac{6*a*x_i^2*h+2*a*h^3+4*b*x_i*h+2*c*h}{2*h} = 3 * a * x_i^2 + a * h^2 + 2 * b * x_i + c \quad (73b)$$

Logo, para que se possa aproximar com eficiência a função da derivada de primeira ordem do polinômio de 3º grau, o passo h deve tender a um valor w_i , para os pontos internos. É disso que trata a equação 74:

$$\lim_{h \rightarrow w_i} 3 * a * x_i^2 + a * h^2 + 2 * b * x_i + c = 3 * a * x_i^2 + 2 * b * x_i + c \quad (74)$$

Com a substituição de w_i no limite estabelecido, descobrem-se as equações 75 e 76:

$$3 * a * x_i^2 + a * w_i^2 + 2 * b * x_i + c = 3 * a * x_i^2 + 2 * b * x_i + c \quad (75)$$

$$a * w_i^2 = 0 \quad (76)$$

Tendo de ser a diferente de 0 para que existe o polinômio de terceiro grau, a equação 77 é a solução de 74:

$$w_i = 0 \quad (77)$$

Portanto, a estimativa das derivadas nos pontos internos de um polinômio do 3º grau é melhor conforme h tende a 0. Desta vez, isso se repete para os pontos inicial e final, apontando para a dependência do valor de h também nas aproximações para esses pontos. Ao se injetar $x_i - h$ e

$x_i + h$ respectivamente nas equações 56 e 57, é possível chegar às equações 78a, 78b, 78c, 79a, 79b e 79c:

$$D_{est_1} = \frac{a*(x_1+h)^3+b*(x_1+h)^2+c*(x_1+h)+d-[a*x_1^3+b*x_1^2+c*x_1+d]}{h} \quad (78a)$$

$$D_{est_1} = \frac{3*a*x_1^2*h+3*a*x_1*h^2+a*h^3+2*x_1*h+b*h^2+c*h}{h} \quad (78b)$$

$$D_{est_1} = 3 * a * x_1^2 + 3 * a * x_1 * h + a * h^2 + 2 * b * x_1 + b * h + c \quad (78c)$$

$$D_{est_N} = \frac{a*x_N^3+b*x_N^2+c*x_N+d-[a*(x_N-h)^3+b*(x_N-h)^2+c*(x_N-h)+d]}{h} \quad (79a)$$

$$D_{est_N} = \frac{3*a*x_N^2*h-3*a*x_N*h^2+a*h^3+2*x_N*h-b*h^2+c*h}{h} \quad (79b)$$

$$D_{est_N} = 3 * a * x_N^2 - 3 * a * x_N * h + a * h^2 + 2 * b * x_N - b * h + c \quad (79c)$$

Daí extraem-se as equações 80 e 81, que buscam igualar através das variáveis w_0 e w_f , na devida ordem, as expressões algébricas descobertas à derivada de primeira ordem do polinômio de 3º grau:

$$\lim_{h \rightarrow w_0} 3 * a * x_1^2 + 3 * a * x_1 * h + a * h^2 + 2 * b * x_1 + b * h + c = 3 * a * x_1^2 + 2 * b * x_1 + c \quad (80)$$

$$\lim_{h \rightarrow w_0} 3 * a * x_N^2 - 3 * a * x_N * h + a * h^2 + 2 * b * x_N - b * h + c = 3 * a * x_N^2 + 2 * b * x_N + c \quad (81)$$

Sendo w_0 e w_f as variáveis às quais tende h , respectivamente para os pontos inicial e final, para que sejam satisfeitas as equações.

No processo para se resolverem tais equações, substituem-se as variáveis w_0 e w_f , cujos valores são procurados, nas funções dos limites, obtendo-se as equações 82 e 83:

$$3 * a * x_1^2 + 3 * a * x_1 * w_0 + a * w_0^2 + 2 * b * x_1 + b * w_0 + c = 3 * a * x_1^2 + 2 * b * x_1 + c \quad (82)$$

$$3 * a * x_N^2 - 3 * a * x_N * w_f + a * w_f^2 + 2 * b * x_N - b * w_f + c = 3 * a * x_N^2 + 2 * b * x_N + c \quad (83)$$

Assim, são obviamente elucidáveis as equações 84 e 85, que se referem às parcelas que contêm as variáveis w_0 e w_f :

$$w_0 * (3 * a * x_1 + a * w_0 + b) = 0 \quad (84)$$

$$w_f * (-3 * a * x_N + a * w_f - b) = 0 \quad (85)$$

Percebe-se que o valor 0 atribuído às variáveis procuradas satisfaz ambas as igualdades, de maneira que se retomam as equações 86 e 87, tratadas para o polinômio do 2º grau:

$$w_0 = 0 \quad (86)$$

$$w_f = 0 \quad (87)$$

Com base nisso, nota-se que a qualidade da estimativa das derivadas do polinômio do 3º grau é tão melhor quanto mais próximo de 0 estiver o passo h . Contudo, para a presente condição, os resultados não se alteram somente em termos das derivadas estimadas no primeiro e no último ponto conhecidos, mas também em relação às estimativas de todos os pontos internos, já que foi demonstrada a dependência das derivadas estimadas nos pontos internos sobre h . Isso explica a maior variação das funções objetivo encontradas no caso do polinômio do 3º grau em comparação com o que se pôde ver no caso da função quadrática.

Os exemplos dados mostram não somente que a estimativa de derivadas tem sua eficácia, mas que existem diferenças entre os diferentes graus de polinômios cujas derivadas são aproximadas. Primeiramente, a variação das métricas de desempenho diante das mudanças na discretização foi pequena para o caso da função quadrática, calculada a partir do conjunto de 3 pontos.

Depois disso, verificou-se uma mudança muito acentuada das mesmas métricas para o polinômio do 3º grau, determinado para o conjunto de 4 pontos. Perante isso, é importante ser

notado que a maior discretização, ou seja, a redução no passo h , levou à evolução das estimativas feitas, ainda que esta tenha sido pequena.

4.4.2 Estimativa de derivadas no MGB

O modelo MGB produz diversos gráficos como resultados. Dentre estes estão os hidrogramas, pelos quais é medida a qualidade das simulações produzidas pelo programa. Existem dois hidrogramas gerados: o das vazões simuladas e o das vazões observadas. Ambos são construídos com base em um conjunto de pontos conhecidos, possuindo exatamente a mesma quantidade de pontos.

O que ocorre é que o hidrograma das vazões medidas é organizado com os dados de vazão para cada data do período escolhido, isto é, têm-se dados de vazão em função do tempo. Concomitantemente, a simulação é feita para as mesmas datas, sendo exposta com dados calculados em correspondência aos observados.

Outrossim, existem dois conjuntos de pontos que obedecem a uma característica específica: cada valor de x (data) possui apenas uma imagem (vazão observada/simulada). Nesse sentido, pode-se estabelecer que existem polinômios que perpassam todos os pontos de cada um dos conjuntos, ou que ao menos se aproxima razoavelmente deles.

Conforme o que foi verificado, o grau mínimo de um polinômio para que sua curva seja capaz de o fazer deve ser $N-1$ para um conjunto de N pontos. Nesse cenário, a comparação entre os polinômios calculados para os dados simulados e para os dados observados pode revelar circunstâncias importantes sobre a simulação, na medida em que indica como as vazões simuladas se comportam diante das vazões aferidas nos postos fluviométricos.

Então, a utilidade da estimativa das derivadas aparece justamente neste momento, já que se verifica muito difícil a determinação da lei de formação de dois polinômios a partir de números de pontos tão grandes quanto os que gera o MGB. Também é extremamente complexo um comparativo termo a termo de dois polinômios de graus tão elevados. É assim que, ao se estimarem as derivadas em cada ponto conhecido, pode-se compará-las uma a uma de uma forma muito mais simples do que a que se vê no cálculo de funções muito complexas e extensas.

Com tudo isso, resta a questão de se os hidrogramas gerados pelo programa possuem uma discretização suficiente, ou seja, um passo temporal suficientemente pequeno para serem aplicadas as derivadas estimadas. A resposta para esse questionamento é que sim. Existe uma discretização muito eficiente por parte do modelo, haja vista que períodos de anos são divididos em dias.

A título de exemplo, o intervalo de tempo analisado na presente pesquisa se estende desde 01/01/1990 até 29/06/2015, incorporando um total de 9311 dias, isto é, para o passo de 1 dia, têm-se 9310 passos. Frise-se que esse período foi utilizado na fase de aplicação das métricas, e não para a calibração do modelo. Isso significa que o passo de tempo de um dia equivale a aproximadamente 0,000107 multiplicado pelo intervalo completo, o que de fato identifica um passo temporal bastante reduzido, fazendo com que as derivadas estimadas para os hidrogramas tenham confiabilidade.

Destaque-se que o MGB foi selecionado para a aplicação das métricas desenvolvidas de modo independente, por ser um modelo muito utilizado na modelagem hidrológica e que possui alta complexidade, construindo suas simulações com base em SIG em em uma programação robusta (COLLISHONN, 2001).

4.4.3 Explicação das métricas

Antes que as métricas sejam efetivamente deduzidas, é necessário retomar o fato de que os conceitos de comparação entre o comportamento de um determinado dado e o comportamento médio dos dados do conjunto, classificando-o como acima da média, igual à média ou abaixo da média, bem como as razões de comparação entre áreas e comprimentos de gráficos, são aplicados nos trabalhos de Bueno (2020) e Bueno, Pereira e Morais (2021). Tais conceitos foram diretamente utilizados na dedução das métricas de eficiência no presente trabalho.

Igualmente foram usados os conceitos de desenvolvimento estatístico, melhoramento das análises de simulações a partir da observação das falhas intrínsecas às métricas já existentes, composição e combinação de métricas, identificados em muitas pesquisas integrantes da literatura.

Sabe-se que cada ponto do hidrograma das vazões simuladas possui um ponto correspondente no hidrograma de vazões observadas. Evidentemente, tais pontos são correspondentes entre si por representarem dados de uma mesma data. Assim sendo, é evidente que existe uma distância entre esses pontos, o que logicamente também vale para os dados da vazão de permanência de 90%, Q_{90} .

Entendo que tais pontos possuem a mesma coordenada no eixo x (mesma data), é perceptível que a distância entre ambos é dada pelo módulo da diferença entre suas coordenadas do eixo y , ou seja, o módulo da diferença entre as vazões simulada e medida, conforme a equação 88:

$$M_i = |Q_{s_i} - Q_{m_i}| \quad (88)$$

Sendo M o módulo da diferença entre a vazão simulada (calculada) e a vazão medida (observada) para a data i (m^3/s), Q_{s_i} a vazão simulada para a data i (m^3/s), e Q_{m_i} a vazão medida na data i (m^3/s).

Dessa maneira, o módulo para a vazão Q_{90} pode ser calculada pela equação 89, bem como a média de todos os módulos é dada pela equação 90:

$$M_{90} = |Q_{s_{90}} - Q_{m_{90}}| \quad (89)$$

Sendo M_{90} o módulo determinado para a vazão Q_{90} (m^3/s), $Q_{s_{90}}$ a vazão simulada para a data em que ocorreu a vazão Q_{90} (m^3/s), e Q_{m_i} a vazão medida na data em que ocorreu a vazão Q_{90} (m^3/s).

$$\bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^N |Q_{s_i} - Q_{m_i}|}{N} \quad (90)$$

Sendo \bar{M} a média de todos os módulos de diferenças do conjunto (m^3/s), e N o número de vazões calculadas e observadas.

De posse de tais informações, é viável estabelecer uma relação entre a distância determinada para Q_{90} , o que é interessante como um complemento à análise do erro percentual no cálculo dessa vazão, $\Delta Q_{90}(\%)$.

A base desse raciocínio é a seguinte: $\Delta Q_{90}(\%)$ afere a diferença percentual entre as vazões Q_{90} calculada e observada. Contudo, apesar de ser uma métrica eficiente e utilizada na calibração automática do MGB, o erro percentual pode ser complementado por outra métrica que traga a posição do erro cometido para a vazão Q_{90} em relação ao restante do conjunto.

É interessante que este complemento à métrica $\Delta Q_{90}(\%)$ seja feito, haja vista que $\Delta Q_{90}(\%)$ prevê a análise exclusiva da vazão Q_{90} . Logo, métricas complementares a $\Delta Q_{90}(\%)$ oferecem a possibilidade de que a condição média do conjunto seja verificada para além da análise exclusiva de Q_{90} .

Portanto, pretende-se calcular a média aritmética de todas as distâncias entre os pontos correspondentes e executar a comparação da distância individual determinada para Q_{90} com essa média, de maneira a estabelecer a posição desse módulo da diferença perante o todo do hidrograma. Para tanto, X_I é a métrica encontrada através do percentual que a diferença entre o módulo M_{90} e a média \bar{M} representa sobre a média, conforme a equação 91:

$$X_I = \frac{|Q_{s90} - Q_{m90}| - \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N |Q_{s_i} - Q_{m_i}|}{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N |Q_{s_i} - Q_{m_i}|} * 100\% \quad (91)$$

Sendo X_I o percentual de divergência entre o módulo da diferença encontrada para a vazão Q_{90} e a média dos módulos das diferenças para as vazões do hidrograma (%).

Portanto, a métrica X_I afere a porcentagem que a diferença entre o módulo específico da vazão Q_{90} representa dentro da média de todos os módulos. Logo, se o resultado retornado for negativo, isso indica que a distância entre as vazões simulada e medida na posição de permanência de 90% é inferior à média das distâncias. Se for nulo, tem-se que o módulo individual de Q_{90} é exatamente igual à média. E se for positivo, sabe-se que a distância está acima dessa média.

Assim, além de se conhecer o erro percentual cometido pontualmente no cálculo da vazão Q_{90} , pode-se compreender como a distância absoluta entre os dados observado e calculado gerada por esse erro se posiciona em comparação com o todo do conjunto, representado pela média das distâncias absolutas.

Por fim, é viável produzir mais informações a partir da construção de gráficos que situem a diferença absoluta individual de Q_{90} no conjunto, tomando como referência os intervalos delimitados pelos pares de valores mínimo e máximo, diferença e soma entre a média e o desvio padrão e quartis 25% e 75% (*boxplot*).

Pode-se trabalhar também com a distância relativa entre as vazões calculada e observada, ou seja, a razão entre a distância e a vazão medida, conforme a equação 92:

$$M_{r_{90}} = \frac{|Q_{s_{90}} - Q_{m_{90}}|}{Q_{m_{90}}} \quad (92)$$

Sendo $M_{r_{90}}$ o módulo relativo determinado para a vazão Q_{90} (m^3/s).

Portanto, de modo análogo a X_I , X_{I_r} é calculada com a equação 93:

$$X_{1_r} = \frac{\frac{|Q_{s_{90}} - Q_{m_{90}}|}{Q_{m_{90}}} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Q_{s_i} - Q_{m_i}|}{Q_{m_i}}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Q_{s_i} - Q_{m_i}|}{Q_{m_i}}} * 100\% \quad (93)$$

Fato é que essa métrica acrescenta na análise de X_I , que opera com base nas distâncias absolutas, os dados respeitantes às distâncias relativas, o que proporciona a possibilidade de comparação do comportamento exibido em termos absolutos e relativos.

Outra possibilidade de análise, desta vez sem foco específico em uma das vazões, é o comparativo entre as áreas abaixo dos hidrogramas dos dados observados e calculados. Para tanto, é naturalmente preciso que sejam determinadas tais áreas, o que pode ser feito através de um procedimento simples, conforme a regra dos trapézios aplicada a integrais numéricas, representada pela equação 94 (BILLO, 2007):

$$Int = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{y_i + y_{i+1}}{2} * (x_{i+1} - x_i) \quad (94)$$

Sendo Int a integral numérica, n o número de pontos considerados no cálculo, y_i a coordenada y no ponto da posição i , y_{i+1} a coordenada y no ponto da posição seguinte a i , x_{i+1} a coordenada x no ponto da posição seguinte a i , e x_i a coordenada x no ponto da posição i .

Desse modo, sabendo-se que os hidrogramas gerados pelo MGB são compostos por N pontos e contêm dados de tempo (t) no eixo x e de vazão no eixo y , as áreas abaixo das linhas gráficas são dadas pelas equações 95a e 95b a seguir:

$$A_s = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{Q_{s_i} + Q_{s_{i+1}}}{2} * (t_{i+1} - t_i) \quad (95a)$$

$$A_m = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{Q_{m_i} + Q_{m_{i+1}}}{2} * (t_{i+1} - t_i) \quad (95b)$$

Sendo A_s a área abaixo do hidrograma de vazões simuladas (u.a.), $Q_{s_{i+1}}$ a vazão simulada para a data seguinte à data i (m^3/s), t_{i+1} o tempo transcorrido na data seguinte à data i , desde a primeira data (dias), t_i o tempo transcorrido na data i , desde a primeira data (dias), A_m a área abaixo do hidrograma de vazões medidas (u.a.), e $Q_{m_{i+1}}$ a vazão medida para a data seguinte à data i (m^3/s).

Considerando que a diferença $t_{i+1} - t_i$ sempre retornará o passo temporal h , as equações 95a e 95b podem ser reescritas como 96a e 96b:

$$A_s = \frac{h}{2} * \sum_{i=1}^{N-1} (Q_{s_i} + Q_{s_{i+1}}) \quad (96a)$$

$$A_m = \frac{h}{2} * \sum_{i=1}^{N-1} (Q_{m_i} + Q_{m_{i+1}}) \quad (96b)$$

Nessa lógica, com exceção da primeira e da última vazão, todas as demais vazões são duplamente somadas, fazendo com que as equações 97a e 97b sejam verdadeiras:

$$A_s = \frac{h}{2} * [Q_{s_1} + 2 * \sum_{i=2}^{N-1} (Q_{s_i}) + Q_{s_N}] \quad (97a)$$

$$A_m = \frac{h}{2} * [Q_{m_1} + 2 * \sum_{i=2}^{N-1} (Q_{m_i}) + Q_{m_N}] \quad (97b)$$

Sendo Q_{s_1} a vazão simulada para a primeira data (m^3/s), Q_{s_N} a vazão simulada para a última data (m^3/s), Q_{m_1} a vazão medida para a primeira data (m^3/s), e Q_{m_N} a vazão medida para a última data (m^3/s).

Portanto, X_2 é uma métrica determinada pela razão de A_s por A_m , de acordo com a equação 98:

$$X_2 = \frac{Q_{s1} + 2 * \sum_{i=2}^{N-1} (Q_{s_i}) + Q_{sN}}{Q_{m1} + 2 * \sum_{i=2}^{N-1} (Q_{m_i}) + Q_{mN}} \quad (98)$$

Sendo X_2 o coeficiente de comparação das áreas.

Nesse cenário, quando X_2 apresentar um valor entre 0 e 1,0, isso aponta para uma tendência do modelo de subestimar as vazões. O resultado igual a 1 aponta para uma simulação perfeitamente correta, e um dado maior que 1 aponta para uma tendência de superestimativa.

Isso acontece, porque $X_2 < 1$ indica uma área menor abaixo do hidrograma simulado em relação à área abaixo do hidrograma observado, ou seja, as vazões calculadas tendem a ser menores do que as medidas. Quando $X_2 > 1$, o exato oposto ocorre, e quando $X_2 = 1$, o que é muito difícil de se dar na prática, existe a chance de que haja uma concordância completa entre as vazões calculadas e as vazões observadas.

Contudo, para se ter uma melhor ideia do significado de X_2 , a métrica deve ser analisada perante os percentuais de subestimativa (PSUB), superestimativa (PSUP) e igualdade (PIG), determinados pelas equações 99, 100 e 101:

$$PSUB = \frac{NSUB}{N} * 100\% \quad (99)$$

Sendo $NSUB$ o número de vezes em que o modelo subestime as vazões, e N o número total de vazões.

$$PSUP = \frac{NSUP}{N} * 100\% \quad (100)$$

Sendo $NSUP$ o número de vezes em que o modelo superestime as vazões.

$$PIG = \frac{NIG}{N} * 100\% \quad (101)$$

Sendo NIG o número de vezes em que o modelo acerte perfeitamente as simulações com as vazões observadas.

Vale ressaltar que entre N , $NSUB$, $NSUP$ e NIG , existe a relação apresentada na equação 102:

$$N = NSUB + NSUP + NIG \quad (102)$$

A análise de X_2 diante dos percentuais propicia uma percepção melhor das condições de subestimativa e superestimativa. Enquanto os percentuais funcionam de maneira a quantificar os processos de subestimativa e superestimativa, a métrica X_2 vem a quantificar a intensidade desses processos.

A título de exemplo, visando a um melhor esclarecimento, seja tomada a seguinte situação imaginária: têm-se 3 postos fluviométricos para os quais são feitas simulações. No posto A observa-se um valor de X_2 igual a 0,54, no posto B um valor de 0,81, e no posto C um dado de 1,07. Ao mesmo tempo, em A $PSUB$, $PSUP$ e PIG valem respectivamente 68,50%, 31,50% e 0,00%. Já em B, os valores observados são 66,39%, 33,61% e 0,00%, enquanto que em C vê-se 51,49%, 48,51% e 0,00%.

É possível notar que, embora o valor de X_2 no posto B seja substancialmente maior do que o valor da métrica no posto A, os percentuais de subestimativa em ambos os postos são, além das maiores porcentagens, próximos entre si.

Logo, o que provavelmente acontece é que X_2 aponta para uma maior intensidade de subestimativa em A, de maneira que ainda que as quantidades de vazões estimadas sejam parecidas nas duas estações, em A as diferenças negativas entre as vazões simuladas e as vazões medidas tendem a ser mais significativas do que em B.

Simultaneamente, é possível perceber que os percentuais de superestimativa também são próximos entre si nos postos A e B. Assim, para este exemplo pode ser ainda presumido que a superestimativa em A ocorreu com menos intensidade do que em B, produzindo para aquele um menor valor de X_2 .

Algo que é igualmente interessante de ser analisado diz respeito à estação fluviométrica C, onde se vê um percentual de subestimativa ligeiramente superior ao percentual de superestimativa, a despeito de ser maior que 1 o valor calculado de X_2 , o que a princípio indicaria uma tendência de superestimativa por parte do modelo.

Ao nível deste exemplo, pode-se supor para esta situação que a intensidade da subestimativa é maior do que a intensidade da superestimativa, fazendo com que as vazões subestimadas, embora minoritárias, sejam mais significativas do que as superestimadas, conduzindo ao dado encontrado da métrica.

É importante ser dito que cada caso deve ser analisado individualmente para que se levantem as melhores explicações diante da avaliação de X_2 diante dos percentuais, sendo o elaborado anteriormente apenas um exemplo para que se torne mais claro o funcionamento desse tipo de análise.

É igualmente possível ser executado um comparativo entre os comprimentos das linhas gráficas dos hidrogramas de vazões simuladas e observadas. O cálculo desses comprimentos respeita um procedimento simples, baseado no somatório das distâncias entre os pontos adjacentes, que depende tão somente do teorema de Pitágoras (NASCIMENTO, 2018), de acordo com a equação 103:

$$D_{p_{i-1}} = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad (103)$$

Sendo $D_{p_{i-1}}$ a distância entre dois pontos consecutivos (u.c.), x_{i-1} a coordenada x no ponto da posição anterior a i , e y_{i-1} a coordenada y no ponto da posição anterior a i .

Portanto, as distâncias entre pontos consecutivos nos hidrogramas são dadas pelas equações 104a e 104b:

$$D_{s_{i-1}} = \sqrt{(t_i - t_{i-1})^2 + (Q_{s_i} - Q_{s_{i-1}})^2} \quad (104a)$$

$$D_{m_{i-1}} = \sqrt{(t_i - t_{i-1})^2 + (Q_{m_i} - Q_{m_{i-1}})^2} \quad (104b)$$

Sendo D_{si-1} a distância entre dois pontos consecutivos no hidrograma de vazões simuladas (u.c.), t_{i-1} o tempo transcorrido na data anterior à data i , desde a primeira data (dias), Q_{si-1} a vazão simulada para a data anterior à data i (m^3/s), D_{mi-1} a distância entre dois pontos consecutivos no hidrograma de vazões medidas (u.c.), e Q_{mi-1} a vazão medida para a data anterior à data i (m^3/s).

Logo, o comprimento total das linhas gráficas é dado pelo somatório das distâncias individuais, conforme as equações 105a e 105b, sendo considerado que as diferenças entre tempos de datas consecutivas serão sempre iguais ao passo temporal h :

$$L_s = \sum_{i=2}^N \sqrt{h^2 + (Q_{s_i} - Q_{s_{i-1}})^2} \quad (105a)$$

$$L_m = \sum_{i=2}^N \sqrt{h^2 + (Q_{m_i} - Q_{m_{i-1}})^2} \quad (105b)$$

Sendo L_s o comprimento do hidrograma de vazões simuladas (u.c.), e L_m o comprimento do hidrograma de vazões medidas (u.c.).

Ao se dividir o menor de ambos os comprimentos pelo maior deles, constrói-se um coeficiente variante entre 0 e 1,0, que quanto mais próximo de 1,0, ou seja, quanto maior o valor retornado, aponta para uma maior similaridade entre os hidrogramas em termos de comprimento. Isso é representado pela equação 106:

$$X_3 = \frac{\text{MÍNIMO} \left(\sum_{i=2}^N \sqrt{h^2 + (Q_{s_i} - Q_{s_{i-1}})^2}; \sum_{i=2}^N \sqrt{h^2 + (Q_{m_i} - Q_{m_{i-1}})^2} \right)}{\text{MÁXIMO} \left(\sum_{i=2}^N \sqrt{h^2 + (Q_{s_i} - Q_{s_{i-1}})^2}; \sum_{i=2}^N \sqrt{h^2 + (Q_{m_i} - Q_{m_{i-1}})^2} \right)} \quad (106)$$

Sendo X_3 o coeficiente de comparação dos comprimentos.

Evidentemente, o comparativo dos comprimentos dos hidrogramas não é capaz de isoladamente identificar uma maior ou menor qualidade dos dados. Contudo, métrica complementa a análise feita por X_2 , assim como é complementada por esta.

Um alto valor de X_3 junto a um resultado de X_2 próximo a 1,0, com percentuais de subestimativa e superestimativa razoavelmente equilibrados compõem um conjunto que aponta para a tendência de aproximação entre os hidrogramas, ou seja, indicam uma boa simulação.

Com base no desenvolvimento da estimativa de derivadas, pode-se pensar na ideia de comparar os polinômios a partir da razão de suas derivadas correspondentes. Logo, pelas equações de estimativa, sabe-se que para os pontos internos, as equações 107a e 107b satisfazem a aproximação das derivadas nos hidrogramas:

$$D_{est,s_i} = \frac{Q_{s_{i+1}} - Q_{s_{i-1}}}{2 * h} \quad (107a)$$

$$D_{est,m_i} = \frac{Q_{m_{i+1}} - Q_{m_{i-1}}}{2 * h} \quad (107b)$$

Sendo D_{est,s_i} a derivada estimada no ponto i do hidrograma de vazões simuladas, e D_{est,m_i} a derivada estimada no ponto i do hidrograma de vazões medidas.

Simultaneamente, obtêm-se analogamente as equações 108a e 108b para os pontos iniciais:

$$D_{est,s_1} = \frac{Q_{s_2} - Q_{s_1}}{h} \quad (108a)$$

$$D_{est,m_1} = \frac{Q_{m_2} - Q_{m_1}}{h} \quad (108b)$$

Sendo D_{est,s_1} a derivada estimada no primeiro ponto do hidrograma de vazões simuladas, Q_{s_2} a segunda vazão simulada (m^3/s), Q_{s_1} a primeira vazão simulada (m^3/s), D_{est,m_1} a derivada estimada no primeiro ponto do hidrograma de vazões medidas, Q_{m_2} a segunda vazão medida (m^3/s), e Q_{m_1} a primeira vazão medida (m^3/s).

Por fim, o mesmo deve ser feito para os pontos finais, como nas equações 109a e 109b:

$$D_{est,s_N} = \frac{Q_{s_N} - Q_{s_{N-1}}}{h} \quad (109a)$$

$$D_{est,m_N} = \frac{Q_{m_N} - Q_{m_{N-1}}}{h} \quad (109b)$$

Sendo D_{est,s_N} a derivada estimada no último ponto do hidrograma de vazões simuladas, Q_{s_N} a última vazão simulada (m^3/s), $Q_{s_{N-1}}$ a penúltima vazão simulada (m^3/s), D_{est,m_N} a derivada estimada no último ponto do hidrograma de vazões medidas, Q_{m_N} a última vazão medida (m^3/s), e $Q_{m_{N-1}}$ a penúltima vazão medida (m^3/s).

Portanto, torna-se viável deduzir as equações 110a, 110b e 110c, responsáveis por representar as razões entre as derivadas:

$$R_{d_i} = \frac{Q_{s_{i+1}} - Q_{s_{i-1}}}{Q_{m_{i+1}} - Q_{m_{i-1}}} \quad (110a)$$

$$R_{d_1} = \frac{Q_{s_2} - Q_{s_1}}{Q_{m_2} - Q_{m_1}} \quad (110b)$$

$$R_{d_N} = \frac{Q_{s_N} - Q_{s_{N-1}}}{Q_{m_N} - Q_{m_{N-1}}} \quad (110c)$$

Sendo R_{d_i} a razão das derivadas estimadas para a data i , R_{d_1} a razão das derivadas estimadas para a primeira data, e R_{d_N} a razão das derivadas estimadas para a última data.

Nesse cenário, é possível concluir que em uma situação ideal, em que a simulação corresponde perfeitamente aos dados observados, todas as razões de derivadas calculáveis, ou seja, cujo denominador seja diferente de 0, são iguais a 1,0. Assim sendo, a média aritmética dessas razões é também igual a 1,0.

Então, antes de ser dada continuidade, é necessário que se conclua como deve ser determinada essa média. É exatamente disso que trata a equação 111:

$$\overline{R_d} = \frac{1}{N_d} * \left[\frac{Q_{s_2} - Q_{s_1}}{Q_{m_2} - Q_{m_1}} + \sum_{i=2}^{N-1} \left(\frac{Q_{s_{i+1}} - Q_{s_{i-1}}}{Q_{m_{i+1}} - Q_{m_{i-1}}} \right) + \frac{Q_{s_N} - Q_{s_{N-1}}}{Q_{m_N} - Q_{m_{N-1}}} \right] \quad (111)$$

Sendo $\overline{R_d}$ a média aritmética das razões de derivadas estimadas, e N_d o número de razões calculáveis.

Estando entendido que um indicativo é tão mais desejável quanto representado por uma média próxima a 1,0, ocorre um problema: tal valor pode ser menor ou maior que 1,0, e diferente do que ocorre em X_2 , essa diferença não aponta para nada em específico. Para sanar a dificuldade de que 1,0 não é um valor limite absoluto a ser atingido, a presente métrica deve ser tratada como uma função modular, como na equação 112:

$$X_4 = \left| \frac{1}{N_d} * \left[\frac{Q_{s_2} - Q_{s_1}}{Q_{m_2} - Q_{m_1}} + \sum_{i=2}^{N-1} \left(\frac{Q_{s_{i+1}} - Q_{s_{i-1}}}{Q_{m_{i+1}} - Q_{m_{i-1}}} \right) + \frac{Q_{s_N} - Q_{s_{N-1}}}{Q_{m_N} - Q_{m_{N-1}}} \right] - 1 \right| \quad (112)$$

Sendo X_4 o coeficiente de comparação das derivadas estimadas.

Em uma função modular como a supracitada, 0 é o valor mínimo que pode ser atingido, e quanto mais notável for a minimização de X_4 , melhor será o seu indicativo, porque o módulo da diferença entre uma média próxima a 1,0 e 1,0 será naturalmente próximo ao valor nulo.

Finalmente, a métrica X_4 é uma função que complementa as análises feitas com os coeficientes X_2 e X_3 , identificando a qualidade da simulação com base em seu traçado. Como as razões das derivadas estimadas acabam sendo traduzidas pelas razões das diferenças entre vazões dos hidrogramas, ainda que as linhas gráficas estejam distantes entre si na área de plotagem, se estas possuírem variações similares nas vazões, ou seja, traçados semelhantes, a função modular tenderá a ser minimizada.

Portanto, ao se unirem as análises de X_2 com os percentuais, X_3 e X_4 , investigam-se as condições de proximidade entre os hidrogramas de vazões simuladas e observadas respectivamente nos aspectos das áreas contidas sob as linhas gráficas, apontando para a tendência de subestimativa ou superestimativa do modelo, dos comprimentos dos hidrogramas, bem como de seus traçados.

A última métrica a ser trabalhada é X_5 . Esta função possui relação com X_1 e X_4 , na medida em que analogamente à primeira, situa a razão das derivadas estimadas para a vazão Q_{90} perante a média das razões, utilizada por X_4 . As equações 113a, 113b e 113c demonstram esse processo, respectivamente para os casos em que Q_{90} se encontra representada em um dos pontos internos, no primeiro ponto dos hidrogramas e no seu último ponto.

$$X_5 = \frac{\frac{Q_{s90+1} - Q_{s90-1}}{Q_{m90+1} - Q_{m90-1}} - \frac{1}{N_d} * \left[\frac{Q_{s2} - Q_{s1}}{Q_{m2} - Q_{m1}} + \sum_{i=2}^{N-1} \left(\frac{Q_{s_{i+1}} - Q_{s_{i-1}}}{Q_{m_{i+1}} - Q_{m_{i-1}}} \right) + \frac{Q_{sN} - Q_{sN-1}}{Q_{mN} - Q_{mN-1}} \right]}{\frac{1}{N_d} * \left[\frac{Q_{s2} - Q_{s1}}{Q_{m2} - Q_{m1}} + \sum_{i=2}^{N-1} \left(\frac{Q_{s_{i+1}} - Q_{s_{i-1}}}{Q_{m_{i+1}} - Q_{m_{i-1}}} \right) + \frac{Q_{sN} - Q_{sN-1}}{Q_{mN} - Q_{mN-1}} \right]} * 100\% \quad (113a)$$

$$X_5 = \frac{\frac{Q_{s2} - Q_{s90}}{Q_{m2} - Q_{m90}} - \frac{1}{N_d} * \left[\frac{Q_{s2} - Q_{s90}}{Q_{m2} - Q_{m90}} + \sum_{i=2}^{N-1} \left(\frac{Q_{s_{i+1}} - Q_{s_{i-1}}}{Q_{m_{i+1}} - Q_{m_{i-1}}} \right) + \frac{Q_{sN} - Q_{sN-1}}{Q_{mN} - Q_{mN-1}} \right]}{\frac{1}{N_d} * \left[\frac{Q_{s2} - Q_{s1}}{Q_{m2} - Q_{m1}} + \sum_{i=2}^{N-1} \left(\frac{Q_{s_{i+1}} - Q_{s_{i-1}}}{Q_{m_{i+1}} - Q_{m_{i-1}}} \right) + \frac{Q_{sN} - Q_{sN-1}}{Q_{mN} - Q_{mN-1}} \right]} * 100\% \quad (113b)$$

$$X_5 = \frac{\frac{Q_{s90} - Q_{sN-1}}{Q_{m90} - Q_{mN-1}} - \frac{1}{N_d} * \left[\frac{Q_{s2} - Q_{s1}}{Q_{m2} - Q_{m1}} + \sum_{i=2}^{N-1} \left(\frac{Q_{s_{i+1}} - Q_{s_{i-1}}}{Q_{m_{i+1}} - Q_{m_{i-1}}} \right) + \frac{Q_{s90} - Q_{sN-1}}{Q_{m90} - Q_{mN-1}} \right]}{\frac{1}{N_d} * \left[\frac{Q_{s2} - Q_{s1}}{Q_{m2} - Q_{m1}} + \sum_{i=2}^{N-1} \left(\frac{Q_{s_{i+1}} - Q_{s_{i-1}}}{Q_{m_{i+1}} - Q_{m_{i-1}}} \right) + \frac{Q_{sN} - Q_{sN-1}}{Q_{mN} - Q_{mN-1}} \right]} * 100\% \quad (113c)$$

Sendo X_5 o percentual de divergência entre razão das derivadas encontrada para a vazão Q_{90} e a média das razões para as vazões do hidrograma (%), Q_{s90+1} a vazão simulada seguinte à vazão de permanência de 90% simulada (m^3/s), Q_{s90-1} a vazão simulada anterior à vazão de permanência de 90% simulada (m^3/s), Q_{m90+1} a vazão medida seguinte à vazão de permanência de 90% medida (m^3/s), e Q_{m90-1} a vazão medida anterior à vazão de permanência de 90% medida (m^3/s).

É claro que a equação 113a é muito mais provável de ser empregada do que as demais, porque existem muito mais pontos internos do que pontos de limite, e a métrica X_5 opera de maneira que quando seu valor é inferior a 0, a razão determinada para Q_{90} é menor que a média das razões. Sendo o percentual igual a 0, tem-se uma razão de Q_{90} exatamente igual à média. E para um resultado superior a 0, essa razão é maior que a média.

De posse de tais informações, vale ressaltar alguns pontos relevantes sobre este desenvolvimento matemático: as razões negativas significam que enquanto um dos dados da vazão de permanência de 90%, seja o calculado ou o observado, encontra-se em um trecho de

crescimento, o outro figura em um trecho de decrescimento, o que faz com que as derivadas tenham sinais opostos.

Além disso, as mesmas análises com relação à média, ao desvio padrão, à mediana, aos quartis 25% e 75%, bem como aos valores máximo e mínimo, outrora cabíveis a X_I são igualmente encaixáveis a X_5 .

4.4.4 Composição de métricas

A equação 114 demonstra a composição elaborada com todas as métricas de eficiência deduzidas ao longo da presente pesquisa, e considerando ainda a métrica já existente ΔQ_{90} .

$$F_c = \Delta Q_{90} * \text{sgn}(\Delta Q_{90}) + X_1 * \text{sgn}(X_1) + X_{1,r} * \text{sgn}(X_{1,r}) + (1 - X_2) * \text{sgn}(1 - X_2) + (1 - X_3) * \text{sgn}(1 - X_3) + X_4 * \text{sgn}(X_4) + X_5 * \text{sgn}(X_5) + PSUB * \text{sgn}(PSUB) + PSUP * \text{sgn}(PSUP) + (1 - PIG) * \text{sgn}(1 - PSIG) \quad (114)$$

Sendo F_c a função objetivo formada pela composição das métricas, e sgn o símbolo para o sinal de cada métrica.

As métricas X_2 , X_3 , $PSUB$, e PIG são subtraídas de 1 na equação, pois seus valores são tidos como melhores quanto mais próximos estiverem de 1. Portanto, F_c é uma função que sempre retorna valores superiores a 0, uma vez que a multiplicação de cada parcela por seu próprio sinal impede que valores negativos apareçam no somatório. Logo, ao ser minimizada, a função F_c oferece uma possibilidade de calibração ao modelo hidrológico.

4.5 CALIBRAÇÃO DO MODELO HBV COM A COMPOSIÇÃO DE MÉTRICAS

O modelo HBV, selecionado para esta etapa por ser de mais simples programação, teve o seu equacionamento devidamente elaborado no Excel. Foram utilizados dados aleatórios de vazões mensais ($\text{hm}^3/\text{mês}$), precipitações diárias (mm) e evapotranspiração diária (mm) disponibilizados pela Universidade Politécnica de Valência (UPV, 2021). O período analisado se estendeu de abril de 1996 a setembro de 2004.

As equações foram aplicadas de modo a se obterem vazões diárias, e a média aritmética de todas as vazões diárias de um mês foi tomada como a vazão simulada pelo modelo para o determinado mês. Nesse sentido, o modelo foi calibrado utilizando-se 4 funções objetivo diferentes: NASH, NASHLOG, |PBIAS| e F_c .

Então, os hidrogramas produzidos em 6 situações diferentes (vazões observadas, dados sem calibração, dados calibrados com NASH, dados calibrados com NASHLOG, dados calibrados com |PBIAS| e dados calibrados com F_c) foram plotados junto a retas de tendência. Os resultados mostrados através dos hidrogramas puderam, a partir desse procedimento, ser analisados, para que se constatasse o efeito da função F_c como ferramenta de calibração do modelo hidrológico. Os valores de R^2 para cada linha de tendência foram determinados.

Saliente-se que o HBV foi selecionado para a calibração com a função objetivo F_c por ser um modelo relativamente simples de ser programado (MEDINA; MUÑOZ, 2020), evitando assim que fosse necessário o trabalho com códigos fontes, como aconteceria no caso do MGB, por exemplo.

4.6 ESTIMATIVAS DE VAZÕES COM MÉDIAS MÓVEIS

Os dados de vazões observadas constantes nos postos fluviométricos selecionados se estendem até a data de 29/06/2015 quando coletados. Para se estabelecer uma comparação com os resultados de previsão gerados pelo MGB, uma previsão de vazões ainda não registradas desde 30/06/2015 até 29/06/2016 foi feita com base na média móvel.

Toda essa previsão foi calculada data por data, ou seja, a média móvel foi determinada para cada dia com os valores correspondentes ao mesmo dia nos anos anteriores desde 1990. O período adotado para a média móvel foi de 5 dias, e 3 tipos de cálculo foram testados segundo o que preconiza a literatura estatística sobre o método: média móvel simples (MMS), média móvel ponderada (MMP) e média móvel com exponencial suavizada (MME).

Por exemplo, para a estimativa de vazão registrada no dia 02/10/2015, utilizaram-se os dados das datas 02/10/1990, 02/10/1991, 02/10/1992, ... , 02/10/2012, 02/10/2013, 02/10/2014, sendo tomados no cálculo da vazão estimada para a data em questão os 5 valores anteriores,

ou seja, 02/10/2010, 02/10/2011, 02/10/2012, 02/10/2013 e 02/10/2014. Com esses dados as três opções de média foram determinadas.

Contudo, antes de se iniciarem esses cálculos, lacunas nos registros de vazões nas estações tiveram de ser preenchidas. Havia dias em que as vazões, por qualquer motivo que fosse, não haviam sido registradas, e isso afetaria a execução de previsões em datas com dados faltantes no histórico. Portanto, para solucionar esse problema, a estimativa por regressão linear foi utilizada como ferramenta no preenchimento dos vazios.

A programação foi elaborada de modo que, se o vazio figurasse na segunda data do período, seria considerado o primeiro dado como a vazão faltante. Se o registro deficitário estivesse na terceira posição ou em qualquer data adiante, seria aplicada a regressão linear nas duas vazões anteriores, sendo a vazão faltante estimada a partir dessa regressão.

Dessa maneira, a estimativa de dados faltantes foi calculada com base na dedução a seguir, que se inicia pela equação 115, a representar uma reta:

$$Q(t_i) = k * t_i + l \quad (115)$$

Sendo $Q(t_i)$ a vazão na posição i (m^3/s), k o coeficiente angular da reta, t_i o tempo na posição i (dias), e l o coeficiente linear da reta.

Estando o dado faltante na posição $i=3$, e sendo $t_1=1$, $t_2=2$ e $t_3=3$, é verdadeira a equação 116:

$$k = \frac{Q(2)-Q(1)}{2-1} = \frac{Q(2)-Q(1)}{1} = Q(2) - Q(1) \quad (116)$$

Sendo $Q(2)$ a vazão na segunda data (m^3/s), e $Q(1)$ a vazão na primeira data (m^3/s).

Ao mesmo tempo, o coeficiente linear pode ser tratado pelas equações 117a e 117b, que chegam à mesma conclusão:

$$l = Q(1) - [Q(2) - Q(1)] * 1 = 2 * Q(1) - Q(2) \quad (117a)$$

$$l = Q(2) - [Q(2) - Q(1)] * 2 = 2 * Q(1) - Q(2) \quad (117b)$$

Assim, faz-se válida a equação 118, que funciona para estimar a vazão faltante, ou $Q(3)$:

$$Q(3) = k * 3 + l = [Q(2) - Q(1)] * 3 + 2 * Q(1) - Q(2) = 2 * Q(2) - Q(1) \quad (118)$$

Logo, percebe-se que a estimativa feita para $Q(3)$ pode resultar negativa, o que não é viável no cálculo de vazões. Sendo assim, caso a equação 118 retornasse um valor negativo ou nulo, a programação adotaria $Q(2)$ como a estimativa para $Q(3)$, de modo que sejam corretas as equações 119a e 119b:

$$Q(3) = 2 * Q(2) - Q(1) \quad \text{para} \quad 2 * Q(2) - Q(1) > 0 \quad (119a)$$

$$Q(3) = Q(2) \quad \text{para} \quad 2 * Q(2) - Q(1) \leq 0 \quad (119b)$$

Sobre a média móvel ponderada, deve-se esclarecer que os pesos das parcelas foram determinados conforme a equação 120:

$$P_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^T n_i} \quad (120)$$

Sendo P_i o peso da vazão na posição i , n_i o número da posição i , e T o número total de vazões consideradas.

A título de exemplo, os pesos das parcelas correspondentes às vazões na 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª posições em um conjunto de 5 dados são dados pelas equações numeradas de 121a a 121e:

$$P_1 = \frac{1}{1+2+3+4+5} \cong 0,0667 \quad (121a)$$

$$P_2 = \frac{2}{1+2+3+4+5} \cong 0,1333 \quad (121b)$$

$$P_3 = \frac{3}{1+2+3+4+5} = 0,2 \quad (121c)$$

$$P_4 = \frac{4}{1+2+3+4+5} \cong 0,2667 \quad (121d)$$

$$P_5 = \frac{5}{1+2+3+4+5} \cong 0,3333 \quad (121e)$$

Assim garantiu-se que as vazões tivessem pesos proporcionais à sua proximidade com a vazão estimada. Conforme mais próxima na linha de tempo, maior seria a importância do valor. Portanto, os pesos crescem a partir da vazão da posição 1 (o menor) rumo à vazão da posição 5 (o maior).

Já para a média móvel com exponencial suavizada, o valor de α adotado foi 0,15, ou seja, deu-se 15% de importância para a média aritmética das última 5 vazões e 85% para a última vazão registrada, considerando-se, assim como na ponderação, que a vazão prevista tende a ser mais próxima das vazões mais próximas a ela no sentido temporal.

4.7 ANÁLISE PROBABILÍSTICA DAS ESTIMATIVAS

Como um complemento às estimativas geradas através de médias móveis e verificadas de acordo com a tendência de viés, foi elaborada uma análise probabilística de ocorrência dos resultados com base em processos de Markov. Para tanto, as variações das vazões em cada uma das séries separadas por datas, como quando da aplicação das médias móveis, foram computadas de acordo com o critério que é introduzido no exemplo a seguir, conforme a Tabela 7.

Tabela 7. Variação das vazões para a data de 30/06 no posto ID 3161.

Data	Qm res (m³/s)	Movimento	Par de movimentos seguidos
30/06/1990	709,54	-	-
30/06/1991	940,95	A	-
30/06/1992	935,77	R	AR
30/06/1993	1081,47	A	RA
30/06/1994	1185,65	A	AA
30/06/1995	959,69	R	AR
30/06/1996	1001,4	A	RA
30/06/1997	824,71	R	AR
30/06/1998	1207,35	A	RA
30/06/1999	970	R	AR

30/06/2000	1373	A	RA
30/06/2001	404	R	AR
30/06/2002	377	R	RR
30/06/2003	772	A	RA
30/06/2004	866	A	AA
30/06/2005	818	R	AR
30/06/2006	763	R	RR
30/06/2007	975	A	RA
30/06/2008	957	R	AR
30/06/2009	1219	A	RA
30/06/2010	946	R	AR
30/06/2011	1138	A	RA
30/06/2012	1096	R	AR
30/06/2013	588	R	RR
30/06/2014	271	R	RR
30/06/2015	351,52	A	RA

Fonte: O autor (2023).

É possível perceber que de 30/06/1990 para 30/06/1991 houve um aumento no valor da vazão medida. Logo, o movimento (coluna 3) foi denominado A, dentre as 3 possibilidades (A para aumento, R para redução e C para constância). Já de 30/06/1991 para 30/06/1992, foi observada uma redução da vazão, ou seja, um movimento R. Assim, o primeiro par (coluna 4) para esta data, foi um par AR, pois verificou-se que um aumento foi sucedido por uma redução. Portanto, todos os pares até a penúltima data, 30/06/2014, foram computados, tal que se determinasse a porcentagem de observação de cada um deles. Neste exemplo, obtiveram-se os resultados mostrados na Tabela 8:

Tabela 8. Percentuais de observação dos pares para o caso exemplificado.

Par de movimentos seguidos	Número	Soma	%
AA	2	11	18.18%
AC	0	11	0.00%
AR	9	11	81.82%
CA	0	0	0.00%
CC	0	0	0.00%
CR	0	0	0.00%
RA	8	12	66.67%
RC	0	12	0.00%
RR	4	12	33.33%

Fonte: O autor (2023).

Tendo sido adotadas para esta análise as estimativas geradas a partir da média móvel com suavização exponencial simples, haja vista que essas obtiveram os melhores resultados na verificação de tendência de viés, o último par da data é composto por um movimento certo, ou seja, determinado conforme vazões medidas, e por um movimento incerto, determinado pela vazão estimada. Em 30/06, o movimento certo do último par foi a redução (R), dada de 30/06/2013 para 30/06/2014, e o movimento incerto foi o aumento de 30/06/2014 para 30/06/2015.

Logo, a série de cadeias de Markov considera que a probabilidade de que um evento previsto pela média móvel se dê é igual ao percentual de sua ocorrência dentro das observações anteriores feitas com os dados medidos de vazão. Finalmente, determinou-se a porcentagem de 66,67% de ocorrência para a estimativa feita.

Tal processo foi automatizado no Excel e repetido para todas as datas com valores estimados pela média móvel com exponencial suavizada simples, ou seja, desde 30/06/2015 até 29/06/2016.

4.8 ANÁLISE DE TENDÊNCIA NAS SÉRIES DE VAZÕES

Ainda mantendo-se a divisão da série de vazões por data, como feito desde as estimativas via médias móveis, as séries temporais de vazão para cada uma das datas foram analisadas sob a óptica dos testes estatísticos de Mann-Kendall, de Pettit e do teste t de *student*. Respectivamente, tais ferramentas visaram a verificar a presença de possíveis tendências nas séries, pontos de ruptura abrupta no comportamento das vazões ao longo do período avaliado, 01/01/1990 a 29/06/2015, e a significância da divergência entre as médias das vazões calculadas na primeira e na segunda metade do período. Em todos os testes estatísticos foi adotado o nível de significância de 0,05, ou 5%.

Para as datas de 30/06 a 31/12, com dados medidos por um número par de anos (26 anos de 1990 a 2015, considerando os dados estimados por média móvel), as médias utilizadas no teste t foram calculadas para os períodos de 1990 a 2002 e 2003 a 2015. Ao mesmo tempo, no caso das datas de 01/01 a 29/06, com dados de vazão de 1990 a 2016, excetuando-se 29/02, as médias foram determinadas para os períodos de 1990 a 2002 e 2003 a 2016. Para o caso

específico de 29/02, utilizaram-se os anos de 1992, 1996 e 2000 no primeiro lote, e 2004, 2008, 2012 e 2016 no segundo.

A função `TESTE.T` do Excel foi aplicada para a execução do teste, que foi tomado como bicaudal, já que a priori não se tinha o direcionamento das possíveis diferenças entre as médias, ao mesmo tempo em que o teste f (função `TESTE.F`) foi fornecido como condição determinante para a realização do teste t sob as hipóteses de variâncias supostamente iguais e variâncias supostamente diferentes.

Após a aplicação dos testes, foram calculados os percentuais de datas com e sem tendências, segundo o teste de Mann-Kendall, com e sem pontos de ruptura, segundo o teste de Pettit, e com e sem diferenças significativas entre as médias de vazões. Além disso, foram determinados os percentuais de datas em que o parâmetro S , do teste de Mann-Kendall, é maior, menor e igual a zero, assim como os percentuais em que a média do segundo período é maior, menor e igual à média do primeiro. Finalmente, gráficos demonstrativos dos resultados dos testes estatísticos foram elaborados a fim de apresentar a distribuição dos dados obtidos ao longo do período de datas cujas séries temporais foram analisadas.

4.9 ANÁLISE DAS SÉRIES TEMPORAIS DE VAZÃO MEDIANTE PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

Em cada série temporal correspondente às variações de vazão em uma determinada data, foi feita a análise da posição das 3 últimas vazões, considerando a vazão estimada pela média móvel com suavização exponencial simples, dentro do conjunto de dados a que pertencem. Esse procedimento foi elaborado como um complemento à análise de tendência, explicada na seção anterior, e foi estruturado com elementos fundamentais da estatística.

Para cada uma das séries temporais foram delimitadas as seguintes faixas de valores: dados inferiores ou iguais ao quartil 25%, superiores ao quartil 25% e inferiores ou iguais à mediana, superiores à mediana e inferiores ou iguais ao quartil 75%, e finalmente dados superiores ao quartil 75%.

Além desses intervalos, também foram delimitados dados inferiores ou iguais à diferença entre a média e o desvio padrão, superiores a essa diferença e inferiores ou iguais à média, superiores à média e inferiores ou iguais à soma da média com o desvio padrão, e por fim, superiores a essa soma. Como todas as vazões das séries temporais eram conhecidas, utilizaram-se a média e o desvio padrão populacionais.

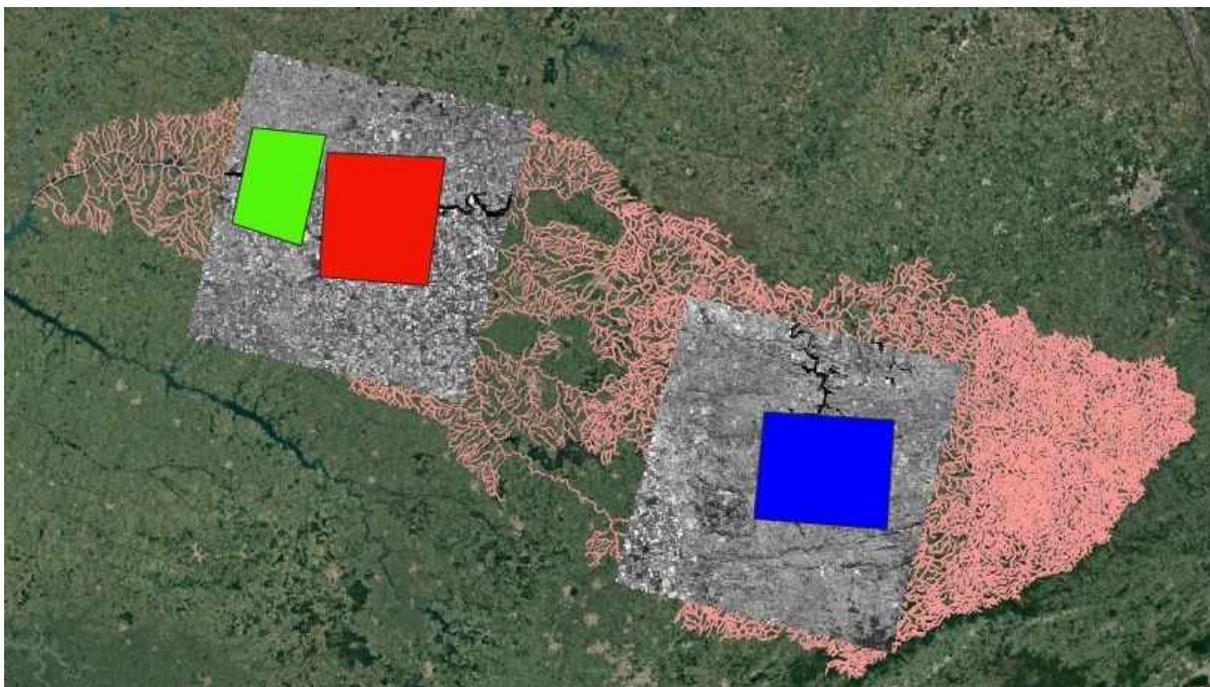
Tendo sido delimitadas as faixas, foram verificados os percentuais de datas cujas 3 últimas vazões das séries temporais se encontravam em cada um dos intervalos. Vale ressaltar que quando uma data figura no percentual relativo a dados acima do quartil 75% ou da soma entre a média e o desvio padrão, isso não significa necessariamente que as 3 últimas vazões da série temporal estejam acima desses parâmetros, mas sim que pelo menos uma das 3 últimas datas supera esses valores estabelecidos.

4.10 ELABORAÇÃO DE MAPAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A fim de se verificarem as alterações sofridas pelo uso do solo na bacia do Rio Grande, mapas de uso e ocupação do solo foram elaborados no QGIS, visando à comparação entre as condições observadas nos anos de 1995, 2005 e 2015. Para tanto, 3 regiões da bacia do Rio Grande foram isoladas para que mapas pudessem ser a partir delas produzidos para os referidos anos.

Para 1995 e 2005, as imagens *Landsat 5* foram baixadas nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do sistema *Earth Explorer*, do United States Geological Survey (USGS) tendo sido as imagens *Landsat 8* acessadas nas bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 para 2015 através do mesmo sistema (USGS, 2023). Após serem importadas para o QGIS, as bandas foram extraídas e reprojetaadas para EPSG: 31982, sendo mescladas em seguida. A extração das bandas se deu por meio de polígonos máscara que delimitam as regiões onde os mapas foram criados. A Figura 15 apresenta o *shapefile* da bacia do Rio Grande retirado do sistema da ANA (ANA, 2014), sinalizado com as bandas não mescladas e com as regiões dos mapas demarcadas por polígonos máscara. Todos esses dados foram inseridos sobre o mapa *Google.cn Satellite*.

FIGURA 15 - Regiões delimitadas para os mapas de uso e ocupação do solo na bacia do Rio Grande



Fonte: O autor (2023).

Como a figura possui caráter meramente ilustrativo, as camadas envolvidas não precisaram passar por reprojeção, estando o mapa *raster Google.cn Satellite* sob SRC (Sistema de Referência de Coordenadas) EPSG: 3857 (coordenadas geográficas), o vetor dos rios da bacia do Rio Grande sob SRC EPSG: 4674 (coordenadas geográficas), e as bandas *Landsat 8* a leste, constantes como camadas *raster*, sob SRC EPSG: 32623 (coordenadas métricas). Enquanto isso, as bandas a oeste, igualmente existentes como camadas *raster*, figuram com SRC EPSG: 32622 (coordenadas métricas), e os polígonos máscara com SRC EPSG: 31982 (coordenadas métricas). Todas as bandas utilizadas são oriundas do satélite *Landsat 8* e datadas de 2015.

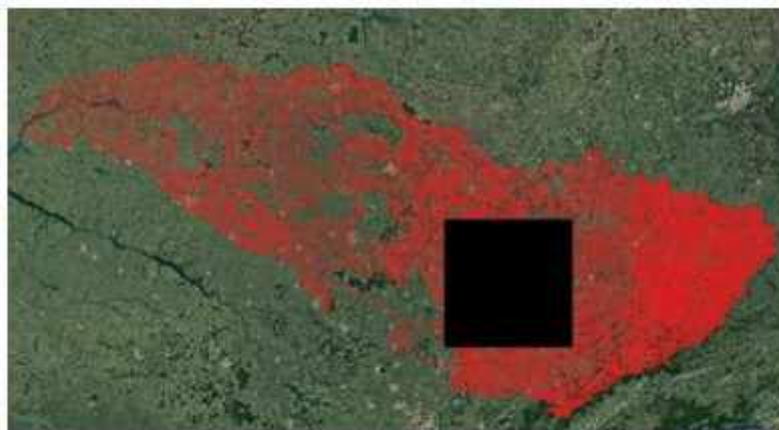
A classificação supervisionada foi feita para tais regiões, sendo compostos então os mapas de uso e ocupação do solo, em que a cor verde foi aplicada para vegetação densa, a vermelha para área urbana, a amarela para plantações e pastagens, a laranja para solos expostos e a azul para água. Então, as comparações entre os mapas gerados foram utilizadas na avaliação das mudanças no uso do solo na bacia do Rio Grande, ao longo de um período de 20 anos, através das amostras coletadas. De leste para oeste, as regiões delimitadas foram numeradas como 1, 2 e 3.

4.11 PREVISÃO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO TERRSET

Inicialmente, para além das 7 bandas *Landsat 8* já acessadas para o ano de 2015, foram baixadas também as bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 para 2020. No *software* TerrSet, foram seleccionadas as bandas 3, 4 e 5 como as bandas das cores azul, verde e vermelha para o *Landsat 5* (ano 1995), bem como as bandas 4, 5 e 6 para as mesmas cores no *Landsat 8* (anos 2015 e 2020). Então, tais bandas foram mescladas, formando uma camada composta, que foi usada para a definição das coordenadas *x* e *y* limite, de maneira que na ferramenta *Window* pudesse executar o recorte das bandas aplicadas conforme tais coordenadas. A mesclagem das bandas recortadas gerou então as imagens que serviram de espaço para a coleta de amostras de áreas cobertas por vegetação densa, área urbana, plantação e pastagem, solo exposto e água, conforme as classificações já elaboradas no QGIS.

Assim, foram constituídos mapas de uso e ocupação do solo em 2 áreas da bacia do Rio Grande, que envolvem as regiões dos mapas outrora produzidos no QGIS, conforme a Figura 16. Nesta figura, a imagem (a) é composta pelo mapa *raster Google.cn Satellite*, em SRC EPSG: 3857 (coordenadas geográficas), pelo *shapefile* da bacia do Rio Grande, em SRC EPSG: 4674 (coordenadas geográficas), e pelo polígono máscara em SRC EPSG: 32623 (coordenadas métricas utilizadas nos mapas de uso e ocupação do solo correspondentes no TerrSet). Ao mesmo tempo, a imagem (b) contém um polígono máscara em SRC EPSG: 32622 (coordenadas métricas também utilizadas nos mapas de uso e ocupação do solo correspondentes no TerrSet). Essa diferença nas coordenadas UTM se deu, porque as bandas *Landsat* que se encontram disponíveis no sistema *Earth Explorer* possuem sistemas de coordenadas diferentes ao longo da cobertura da bacia do Rio Grande. Pelo fato de as camadas do mapa e do vetor dos rios da bacia não terem sido utilizadas no processamento, mas sim, apenas como referências visuais, ambas não precisaram ser reprojetadas.

FIGURA 16 - Áreas (a) leste e (b) oeste da bacia do Rio Grande para as quais foram feitas análises de uso e ocupação do solo



(a)



(b)

Fonte: O autor (2023).

Como variáveis de entrada estáticas, foram inseridos no TerrSet mapas de elevação e de declividade do terreno em porcentagem, gerados no QGIS para as áreas destacadas, a partir da reprojeção do modelo digital de elevação de coordenadas geográficas (EPSG: 4326) para coordenadas UTM (EPSG: 32623 na área leste e EPSG: 32622 na área oeste), que executou a reamostragem dos *pixels* para formato quadrado correspondente a 100 m de lado. A confecção dos mapas de elevação dependeu somente da alteração da simbologia para a facilitação da mostra de diferenças de altitude no MDE, enquanto que a produção dos mapas de declividade se deu na ferramenta de análise de declividade em camadas *raster*, tendo esta sido configurada para retornar declividades em porcentagem.

Segundo Eastman (2020), para que sejam elaboradas no programa previsões de uso e ocupação do solo, é recomendada a declaração das variáveis elevação e declividade. No

TerrSet, os mapas de variáveis tiveram suas geometrias compatibilizadas com os mapas de uso e ocupação do solo na ferramenta *Project*.

Portanto, de posse dos mapas de uso e ocupação do solo nas áreas selecionadas para os anos de 1995, 2015 e 2020, e dos mapas de elevação e declividade, previsões do uso do solo puderam ser feitas de acordo com a seguinte sequência de ações: os mapas de uso e ocupação dos anos de 1995 e 2015 foram declarados no *Land Change Modeler* como as bases para que fossem verificadas as tendências de alteração durante os 20 anos transcorridos. Essa verificação foi feita através das ferramentas *Change Analysis* e *Transition Potentials*, de modo que fossem produzidos os mapas de transição. Foram tomadas como referência as alterações superiores a 25000 hectares para a área leste, e com o limite mínimo de 45000 hectares para a área oeste, para que fossem consideradas apenas as transições mais significativas. Os limiares de área foram altos, haja vista que as áreas analisadas são grandes.

A partir de então, na ferramenta *Change Prediction*, foi feita, para cada uma das 2 áreas em questão, um mapa de previsão de uso e ocupação do solo do ano de 2020. Os mapas de previsão gerados para esse ano passaram por validação junto aos mapas previamente elaborados para 2020, com base nas imagens *Landsat 8*. Em seguida, mais dois mapas de previsão foram gerados, um para 2025 e outro para 2035. É essencial destacar que a ferramenta estatística habilitada no TerrSet para a execução das previsões funciona baseada em cadeias de Markov, de modo que mais uma vez esse processo estatístico foi empregado no presente trabalho.

Os resultados obtidos no TerrSet, bem como os mapas de elevação e de declividade foram utilizados em complemento às análises temporais feitas com os mapas de uso e ocupação do solo trabalhados no QGIS para os anos de 1995, 2005 e 2015, de maneira que a influência das variáveis estáticas na ocupação do solo também pudesse ser constatada através de análises comparativas.

Assim, respeitou-se a regularidade nos intervalos de tempo para tratamentos estatísticos de dados espaciais (RIMAL *et al.*, 2018), uma vez que a previsão final corresponde ao ano de 2035, ou seja, 20 anos após 2015, mantendo o passo de 20 anos com relação ao primeiro ano da análise, 1995. Concomitantemente, a avaliação conjunta com as imagens geradas no QGIS

respeita um intervalo constante de 10 anos, para 1995, 2005, 2015, 2025 (primeira previsão) e 2035 (previsão final).

5 RESULTADOS

5.1 RESULTADOS PRELIMINARES E MÉTRICAS DE DESEMPENHO

5.1.1 Resultados preliminares

Como primeiro resultado preliminar já obtido, tem-se justamente o arquivo MINI.GTP, tratado na seção 4.5 e que contém os dados de cada uma das minibacias oriundas da discretização da área da bacia hidrográfica. Esse arquivo é usado como fonte fundamental de informações para o processamento no MGB e, conseqüentemente, para o procedimento de calibração. Além disso, existem os hidrogramas comparados da primeira simulação para os 4 postos fluviométricos selecionados, que se encontram inseridos o Apêndice A, juntamente aos demais resultados produzidos. Os hidrogramas e as curvas de permanência indicam a necessidade de que o modelo seja calibrado, conforme previsto. Os resultados das funções objetivo e a própria observação visual dos gráficos mostra resultados ainda insatisfatórios.

5.1.2 Análise segundo as métricas de desempenho

A Tabela 9 mostra os resultados das métricas tradicionais, NASH, NASHLOG, R^2 , PBIAS, $\Delta V(\%)$ e $\Delta Q_{90}(\%)$, para os postos fluviométricos envolvidos na simulação:

Tabela 9. Resultados de métricas tradicionais para os 4 postos.

Posto	NASH	NASHLOG	R^2	PBIAS	$\Delta V(\%)$	$\Delta Q_{90}(\%)$
ID 3161	-1,418	-8,856	0,261	-58,929%	-58,944%	-84,80%
ID 3167	-1,133	-7,700	0,376	-57,857%	-58,160%	-59,67%
ID 3182	-1,414	-7,415	0,306	-53,493%	-53,834%	-26,47%
ID 2562	-5,378	-128,535	0,068	-99,962%	-99,961%	-99,96%

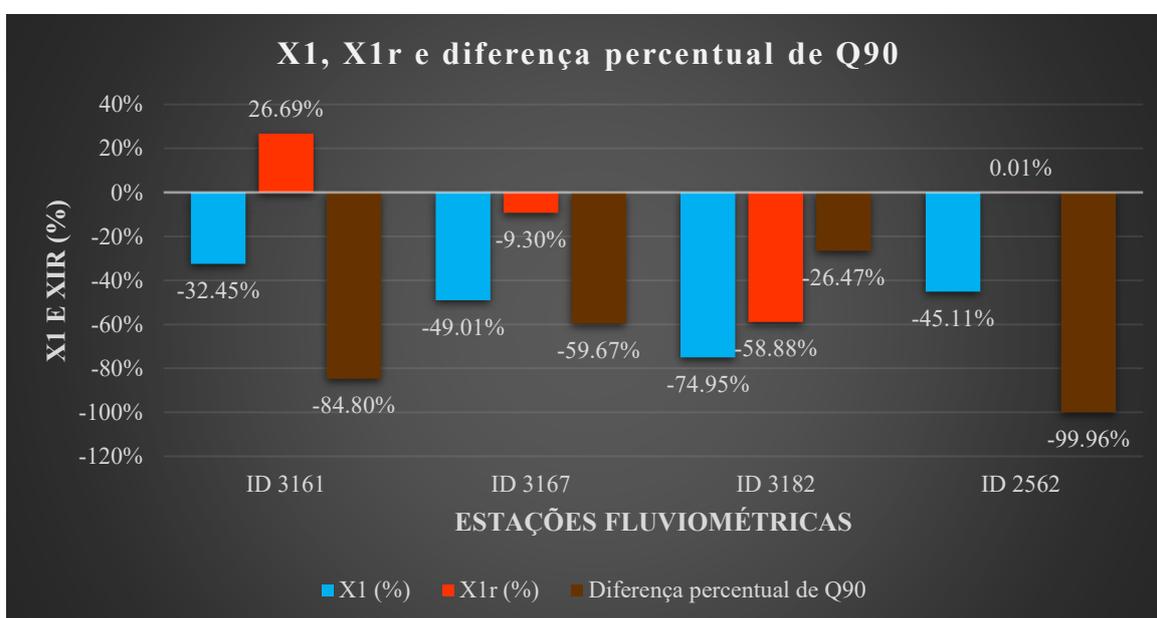
Fonte: O autor (2023).

Estes resultados mostram a baixa qualidade da simulação não calibrada: NASH e NASHLOG são inferiores a 0,36, para módulos de PBIAS superiores a 25% (Oliveira *et al.*, 2019; Liew *et al.*, 2003; Liew *et al.*, 2007). As funções objetivo PBIAS, $\Delta V(\%)$ e $\Delta Q_{90}(\%)$ resultam em valores negativos, indicando uma forte tendência à subestimativa das vazões, especialmente no posto ID 2562. As funções oferecem razoavelmente próximos nos postos ID 3161, ID 3167 e ID 3182, enquanto que sinalizam uma simulação muito inferior em ID 2562.

Ademais, não existe uma concordância completa entre as métricas tradicionais. NASH e R^2 respeitam um mesmo padrão de comportamento, revelando a melhora dos resultados na ordem de estações ID 2562, ID 3161, ID 3182 e ID 3167. Já NASHLOG, PBIAS, $\Delta V(\%)$ e $\Delta Q_{90}(\%)$ o fazem na ordem ID 2562, ID 3161, ID 3167 e ID 3182.

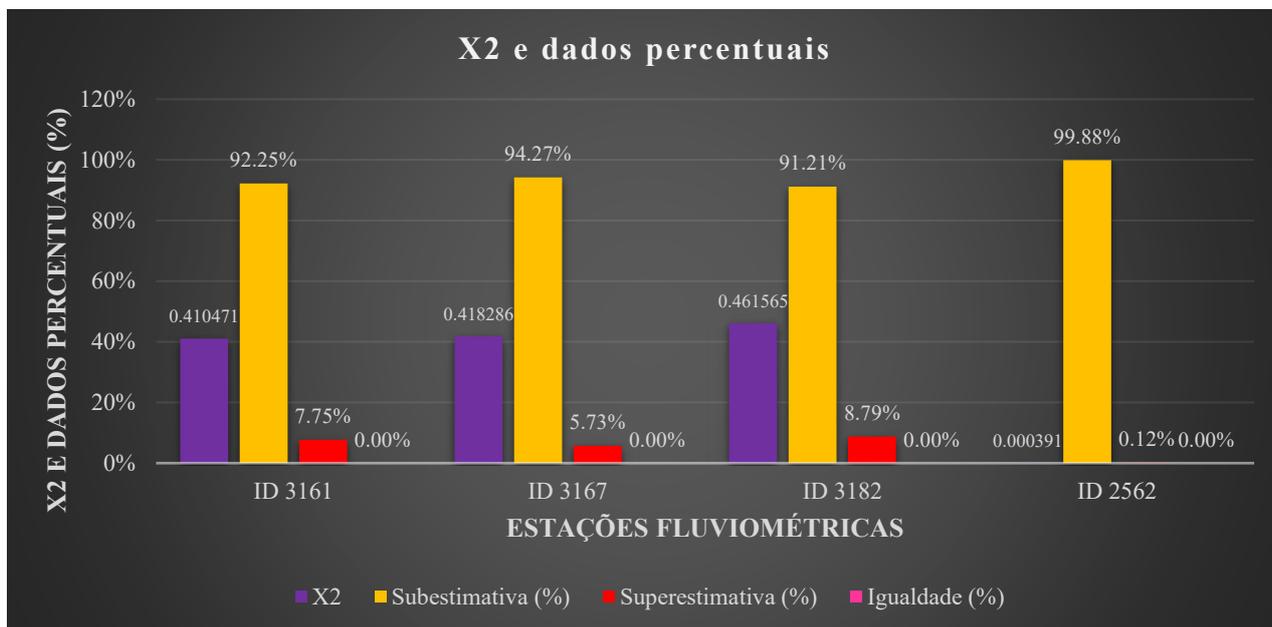
Os gráficos elencados de 4 a 8, por sua vez, apontam as variações das 5 funções entre os postos fluviométricos.

GRÁFICO 4 - Variações de X_I e X_{I_r} perante $\Delta Q_{90}(\%)$ entre as estações fluviométricas



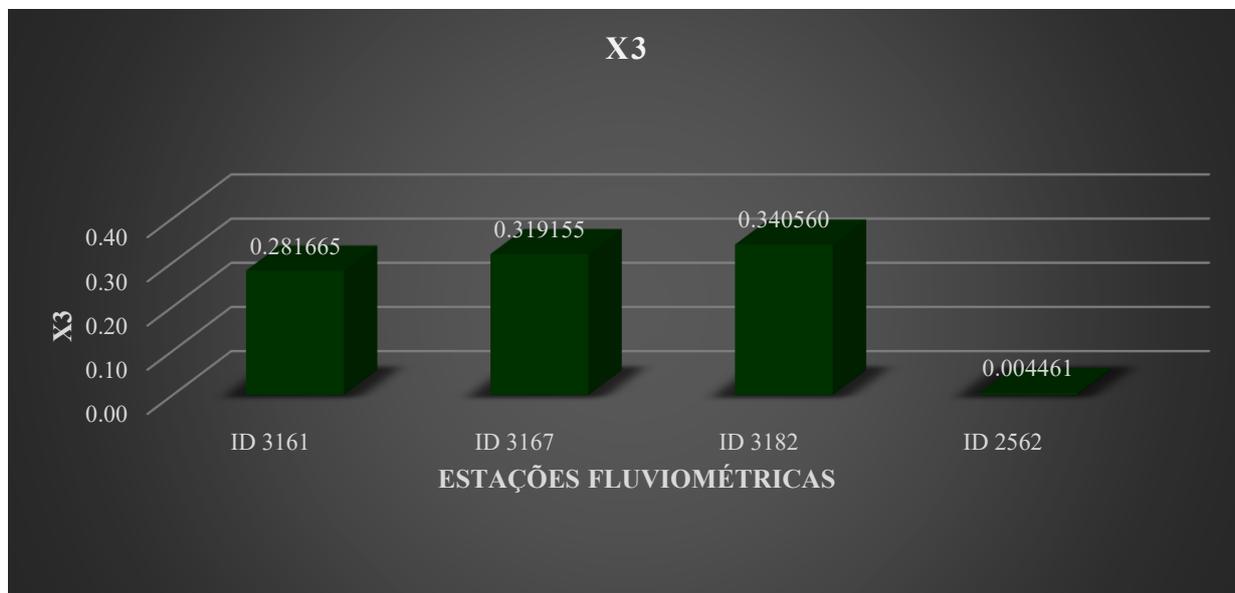
Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 5 - Variações de X_2 perante os dados percentuais de subestimativa, superestimativa e igualdade entre as estações fluviométricas

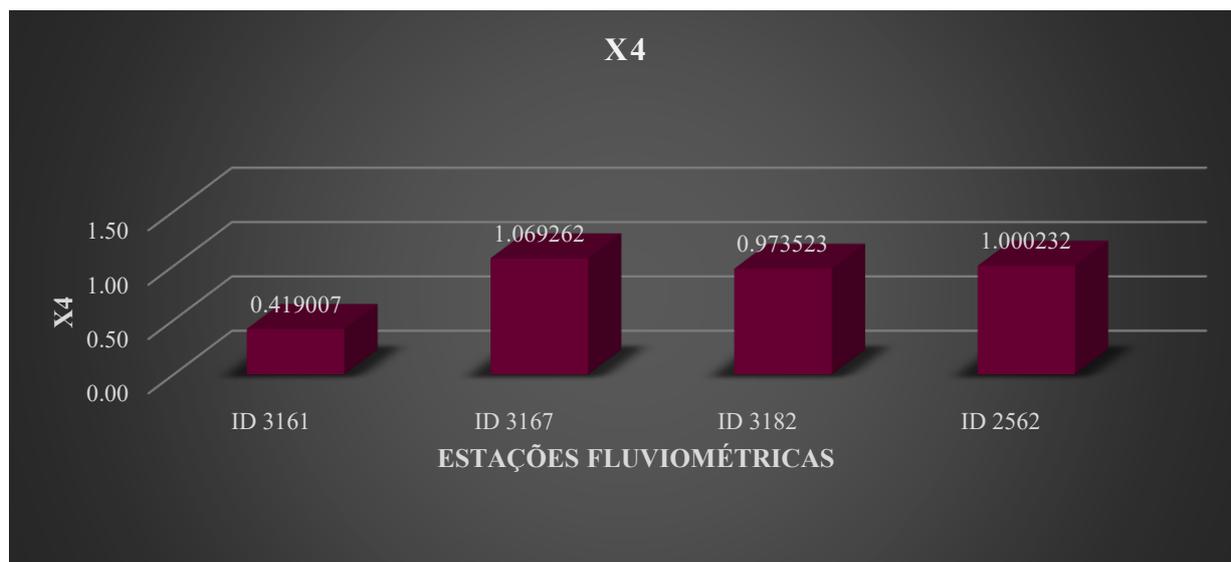


Fonte: O autor (2023).

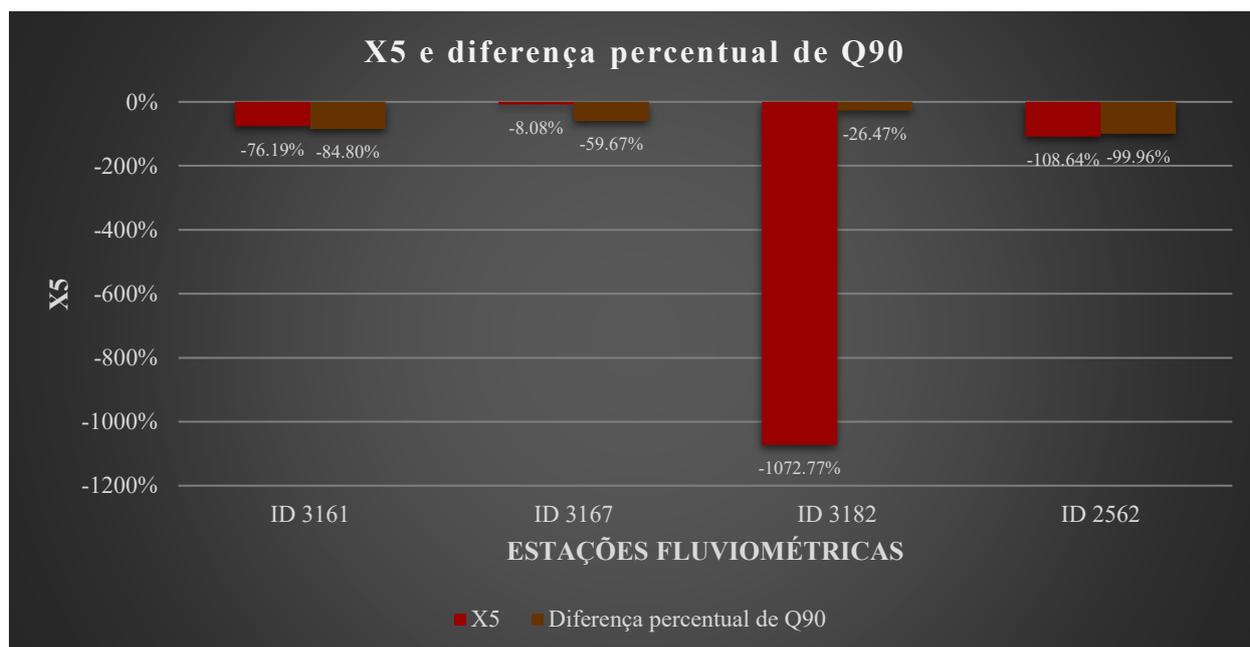
GRÁFICO 6 - Variações de X_3 entre as estações fluviométricas



Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 7 - Variações de X_4 entre as estações fluviométricas

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 8 - Variações de X_5 perante $\Delta Q_{90}(\%)$ entre as estações fluviométricas

Fonte: O autor (2023).

Enquanto todas as vazões Q_{90} foram subestimadas (de acordo com $\Delta Q_{90}(\%)$), principalmente em ID 2562, em termos absolutos, todas as distâncias entre as vazões Q_{90} medida e simulada são inferiores à média das distâncias absolutas de todas as vazões ($X_1 < 0$), sendo ID 3182 o posto onde está a maior divergência em relação à média. Em termos da distância relativa, ID 3161 e ID 2562 tiveram distâncias maiores que a média ($X_{1,r} > 1$), e o erro cometido para a

vazão Q_{90} em ID 2562 está muito próximo à média dessa estação. Enquanto isso, os outros dois postos ficaram abaixo da média ($X_{1r} < 1$), estando a maior divergência em ID 3182.

X_5 também tem valores negativos para todas as estações, ou seja, as razões de derivadas estimadas na vazão Q_{90} são menores do que as médias aritméticas de cada conjunto, com a notória maior divergência em ID 3182. Logo, embora ID 3182 tenha o menor erro de cálculo de Q_{90} , é o posto que apresenta as maiores divergências com relação à média.

X_2 e X_3 indicam melhora nos resultados na mesma ordem de postos de NASHLOG, PBIAS, $\Delta V(\%)$ e $\Delta Q_{90}(\%)$. Todos os valores de X_2 são inferiores a 1, evidenciando uma tendência à subestimativa, o que é confirmado pelos percentuais, já que $PSUB$ é superior a 90% em todas as estações, estando o maior dado em ID 2562, o posto em que se tem um valor destacadamente menor de X_2 , ou seja, uma subestimativa muito mais intensa. X_3 também é muito menor nessa estação, isto é, existe uma divergência muito maior entre os comprimentos dos hidrogramas observado e simulado. Assim X_2 , X_3 e os percentuais são funções que mostram uma simulação muito menos eficiente no posto ID 2562, o que já se entende como verdade.

Os resultados de X_4 são em alguma medida distintos dos demais: 6176080 é a estação com o menor módulo da função, e portanto, com o melhor resultado. Ao mesmo tempo, ID 2562, a estação com os piores valores de X_2 e X_3 , não é a que tem o pior resultado de X_4 , o que ficou a cargo de ID 3167. Os melhores resultados evoluem na ordem ID 3167, ID 2562, ID 3182 e ID 3161. Assim, uma possível conclusão é a de que o desenho da simulação em ID 2562, ou seja, as variações das vazões, são mais próximas aos valores reais em relação ao que acontece em ID 3167, porém com erros muito maiores de simulação, especialmente em termos de subestimativa nos quesitos de quantidade e de intensidade.

Existem análises complementares a essas, envolvendo comparações entre o comportamento das métricas tradicionais e o comportamento das métricas desenvolvidas. Tais resultados e discussões se encontram presentes no Apêndice B.

5.2 HIDROGRAMAS GERADOS COM O MODELO HBV

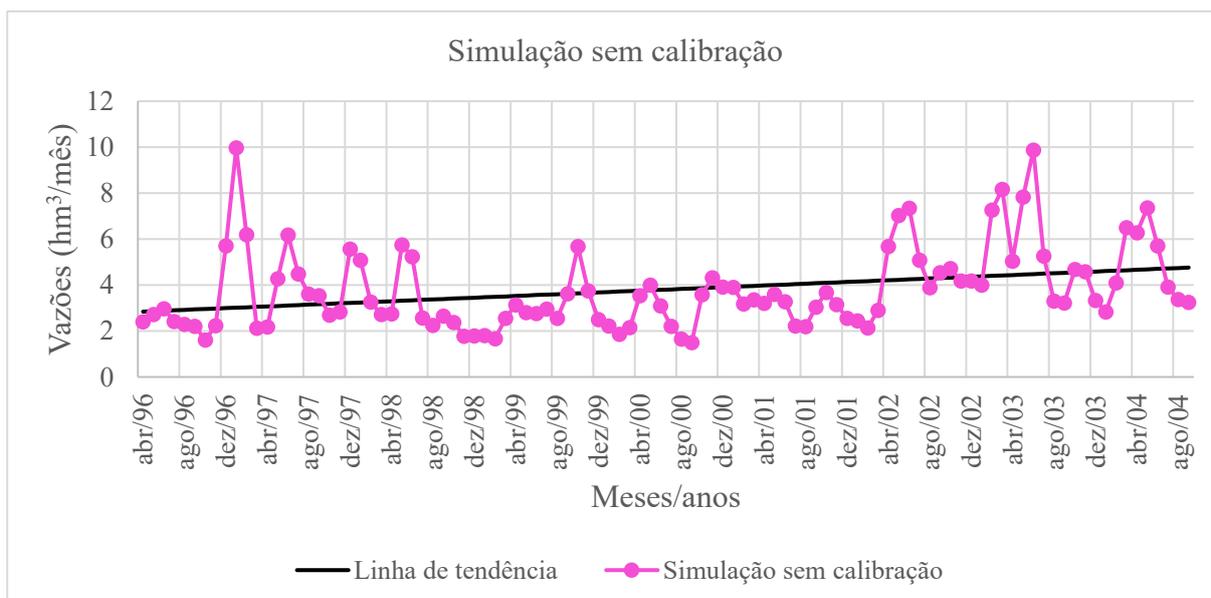
Os gráficos de 9 a 14 trazem o hidrograma de vazões observadas e os hidrogramas constituídos a partir do modelo HBV.

GRÁFICO 9 - Hidrograma e reta de tendência para as vazões observadas



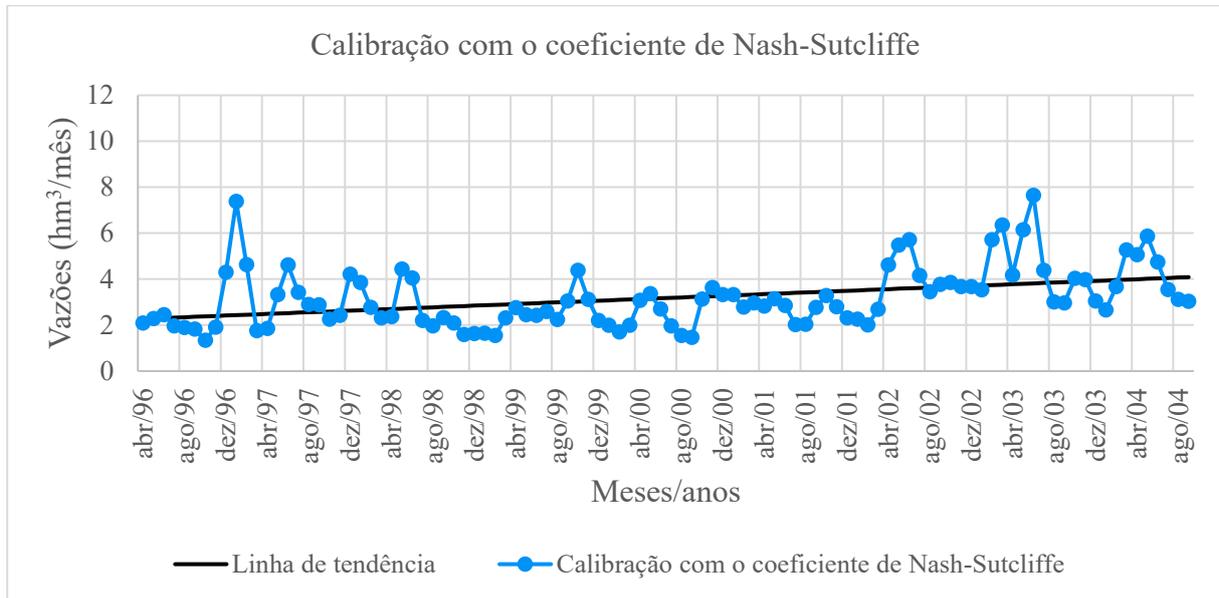
Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 10 - Hidrograma e reta de tendência para as vazões simuladas sem calibração



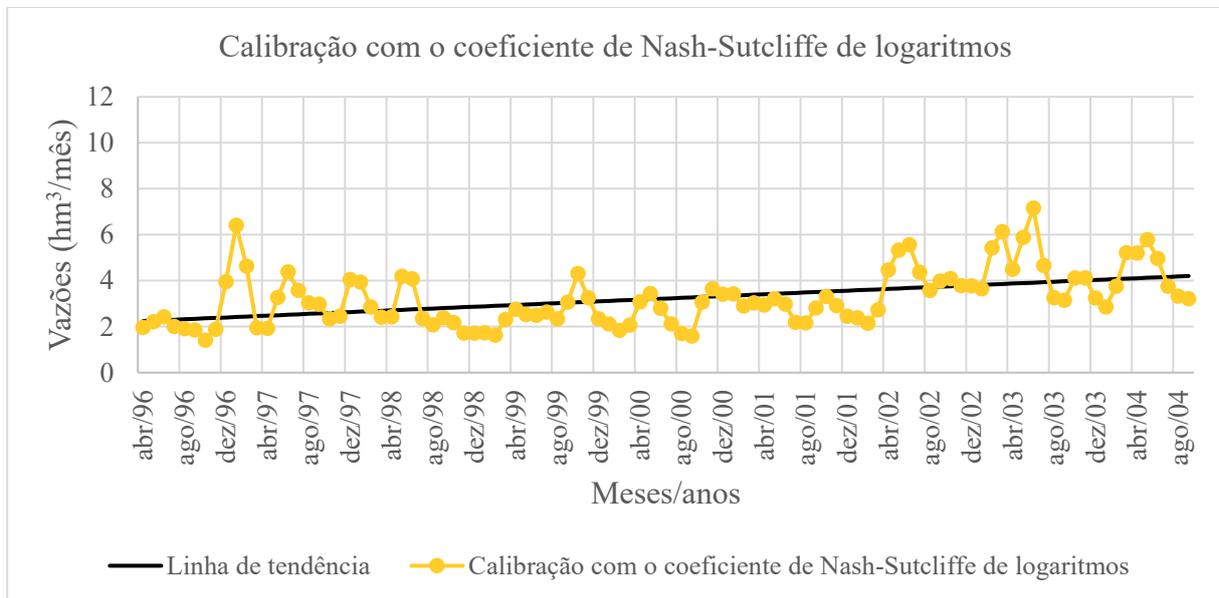
Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 11 - Hidrograma e reta de tendência para as vazões simuladas com calibração através do coeficiente de Nash-Sutcliffe



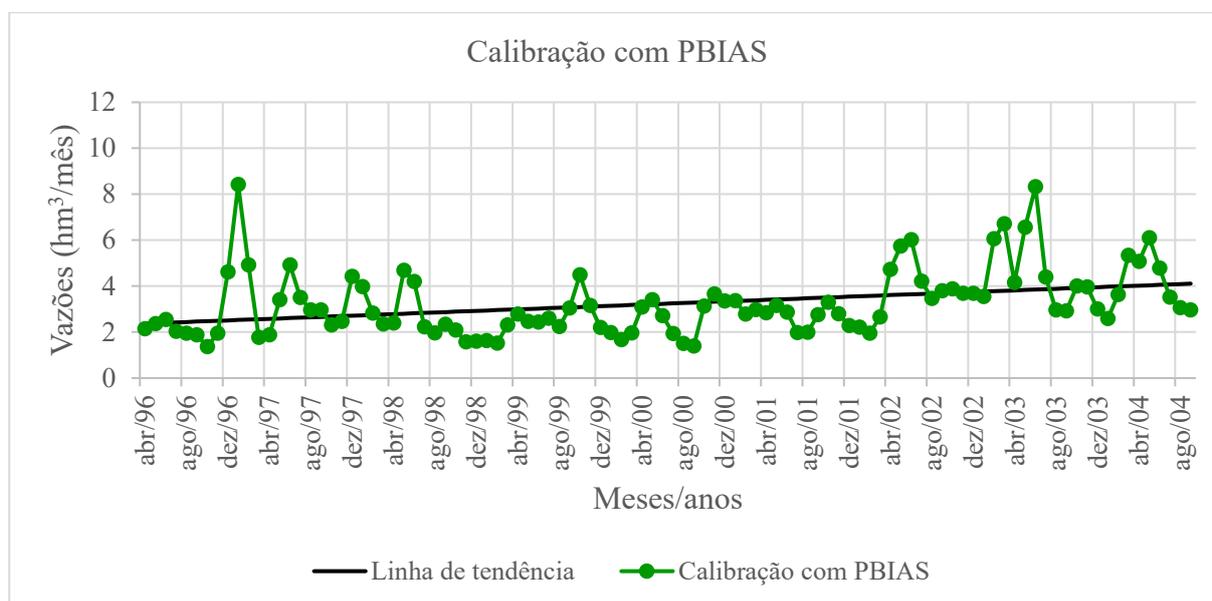
Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 12 - Hidrograma e reta de tendência para as vazões simuladas com calibração através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para logaritmos



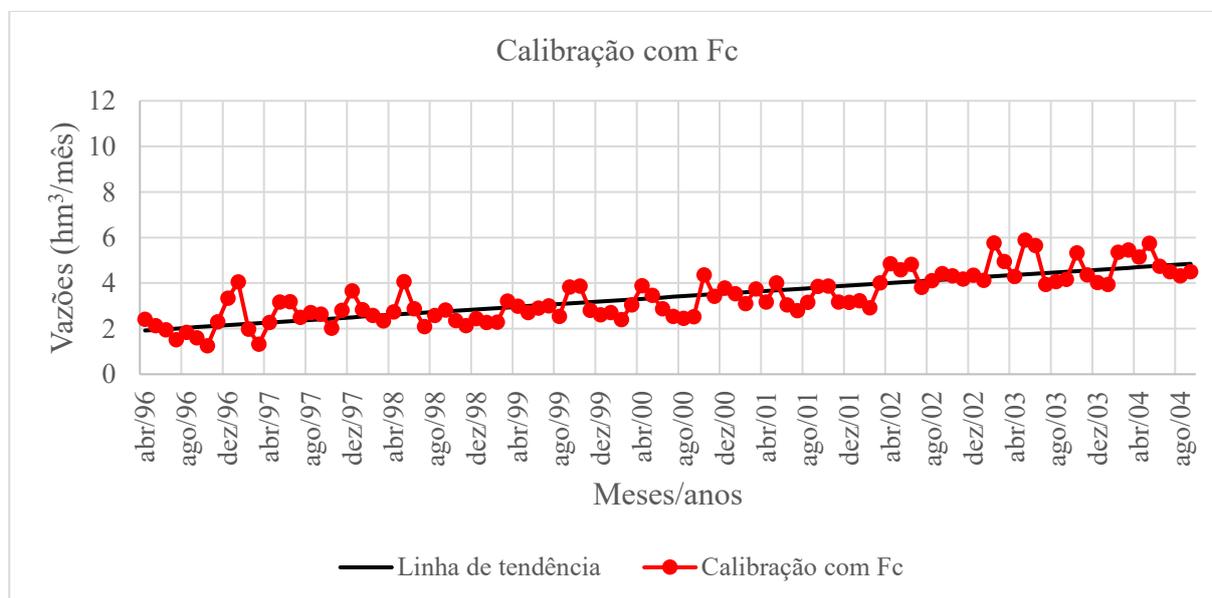
Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 13 - Hidrograma e reta de tendência para as vazões simuladas com calibração através do módulo do percentual de viés



Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 14 - Hidrograma e reta de tendência para as vazões simuladas com calibração através do módulo da função F_c



Fonte: O autor (2023).

Com base nos hidrogramas, percebe-se que o efeito da calibração do modelo pela função F_c difere consideravelmente do que ocorre com as demais calibrações. No caso particular de F_c , não necessariamente se dá uma aproximação completa entre as vazões calculadas e

observadas. Na realidade, o que se verifica é uma suavização dos dados de vazão. A inclinação ascendente da reta de tendência é mantida, porém os dados de vazão ficam muito mais próximos da reta do que em todos os outros casos, o que é constatado pelos valores de R^2 , presentes na Tabela 10.

Tabela 10. Valores de R^2 para os hidrogramas.

Vazões observadas	Sem calibração	NASH	NASHLOG	PBIAS	F_c
0,0589	0,1008	0,1687	0,2277	0,1295	0,6508

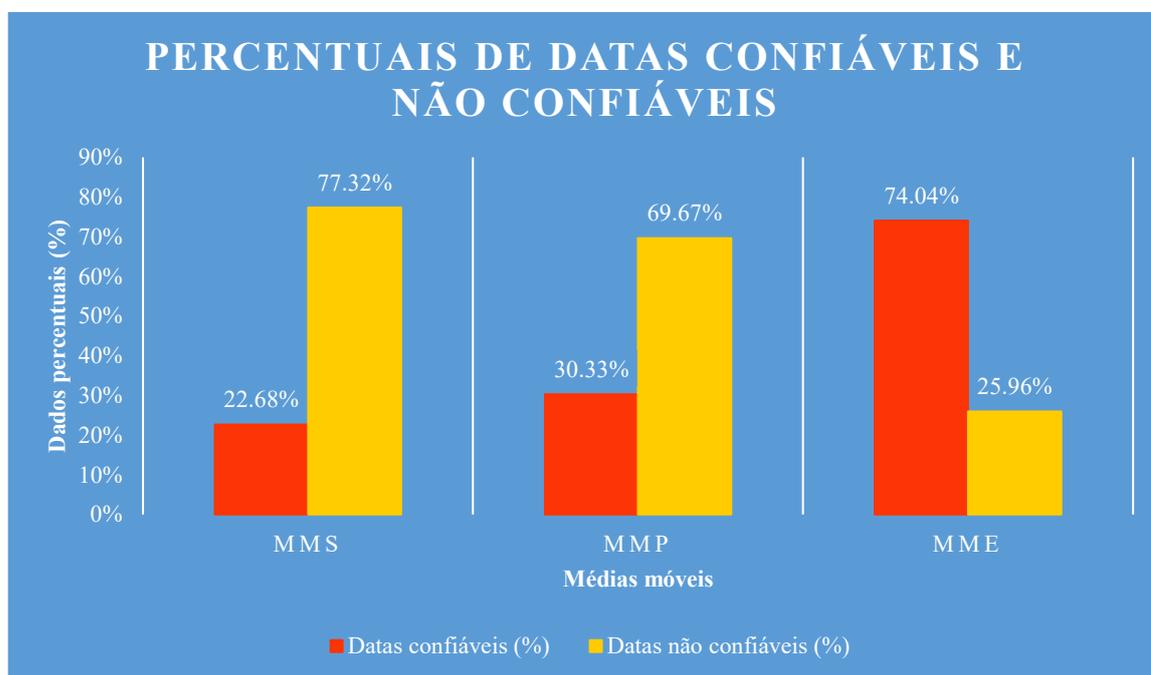
Fonte: O autor (2023).

Por todos esses dados, é notável que a reta de tendência consegue representar com muito mais eficiência dos dados de vazão gerados pelo modelo HBV a partir da calibração com a função objetivo F_c , o que corrobora o demonstrado graficamente através dos hidrogramas, que revelam uma redução dos picos e das depressões presentes na série de dados observados.

5.3 ESCOLHA DA ESTIMATIVA DE VAZÕES COM MÉDIAS MÓVEIS

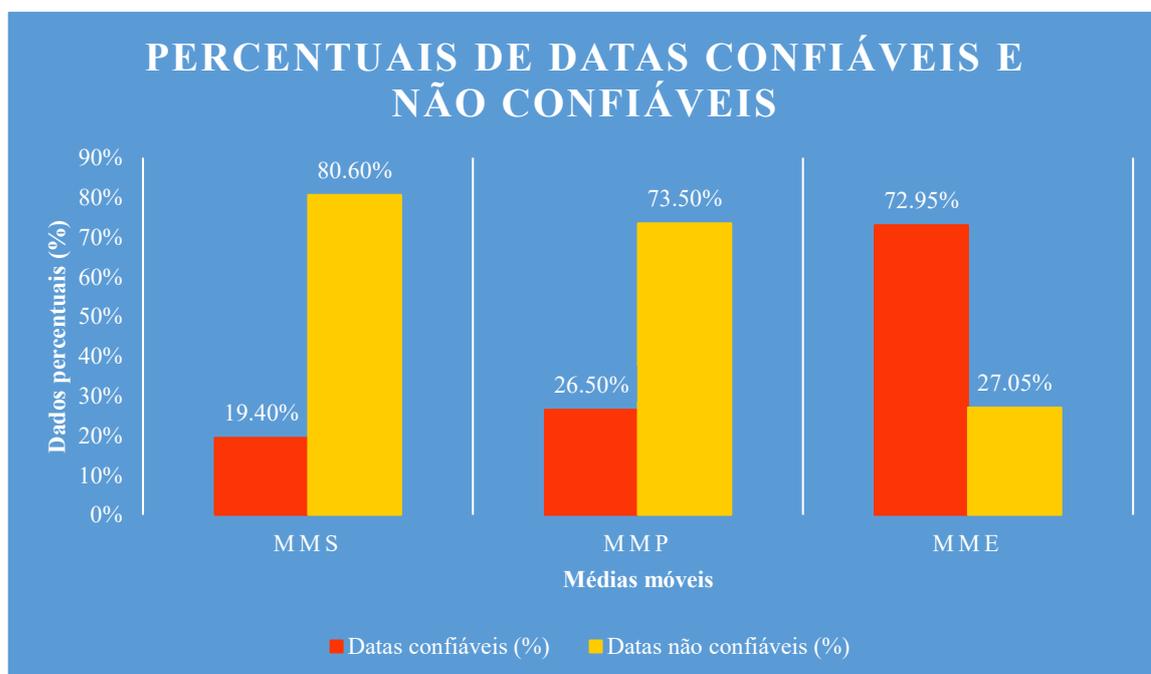
Claramente foi elaborada uma comparação da eficiência dos três modelos, a fim de que a simulação feita através do melhor deles fosse selecionada como aquela a servir de comparativo para os resultados do MGB. A verificação de Tsm foi aplicada conforme a literatura estatística para o modelo de médias móveis. Nesse sentido, uma data é considerada dotada de uma estimativa confiável caso todas as simulações feitas através da média móvel para as vazões observadas resultem em valores de Tsm entre -4 e 4. Os percentuais de datas confiáveis proporcionados pelas estimativas via médias móveis se encontram indicados nos gráficos numerados de 15 a 18.

GRÁFICO 15 - Porcentagem de dias com previsões confiáveis feitas MMS, MMP e MME perante a tendência de viés no posto ID 3161



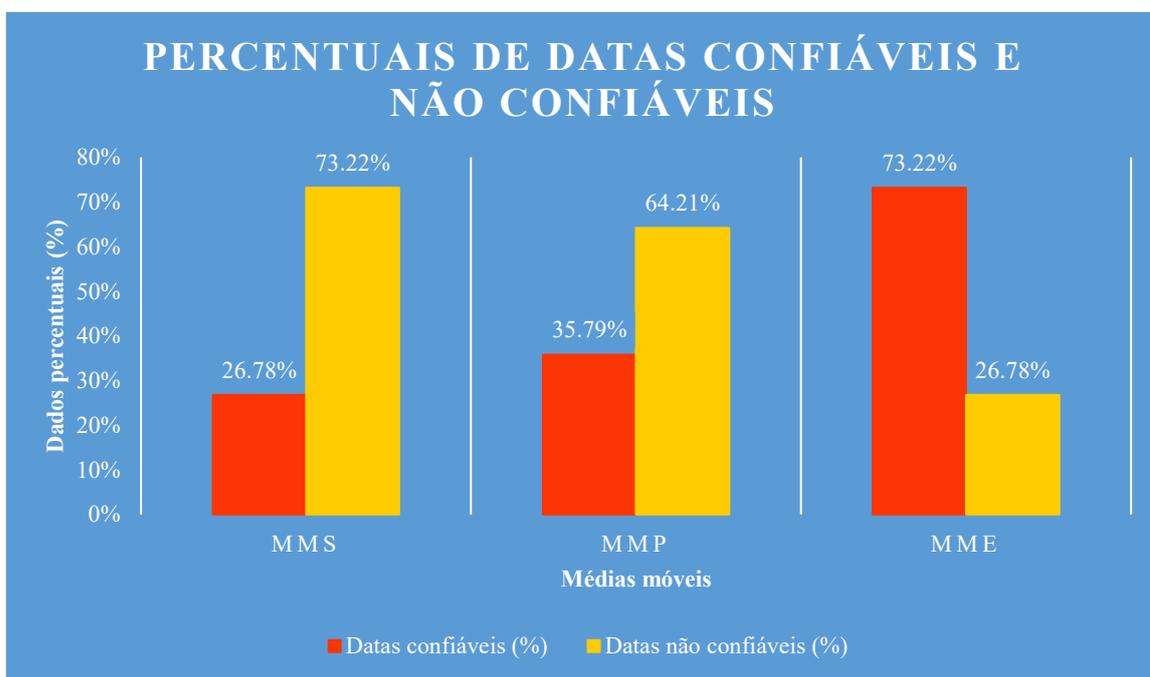
Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 16 - Porcentagem de dias com previsões confiáveis feitas MMS, MMP e MME perante a tendência de viés no posto ID 3167



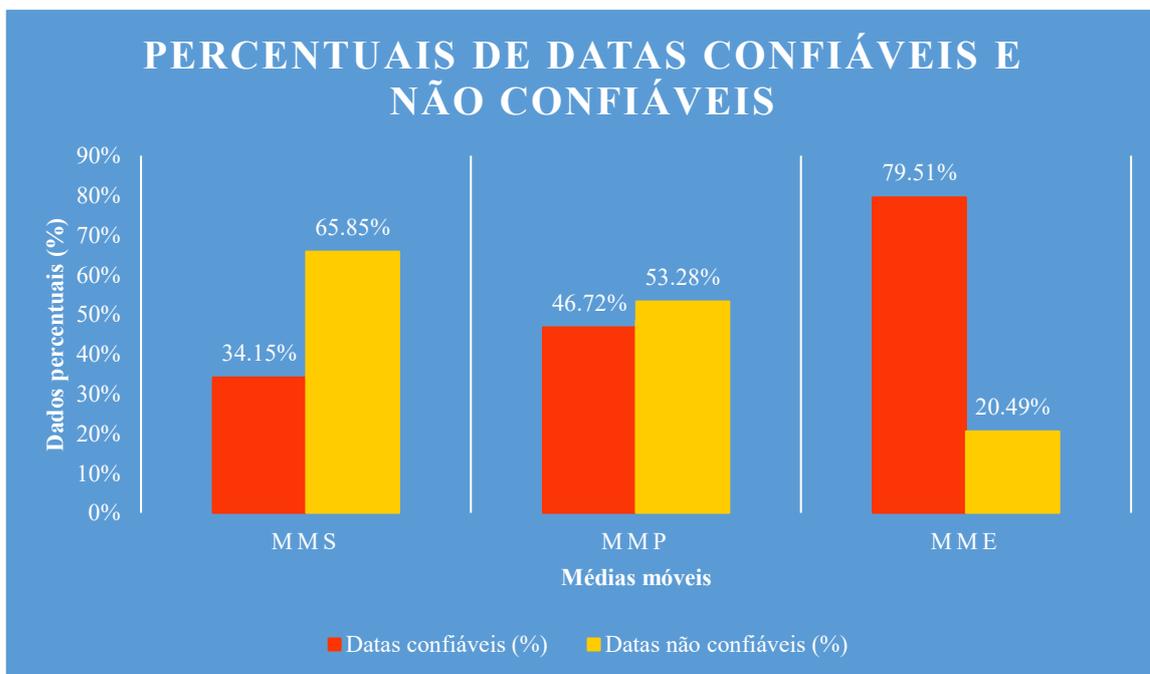
Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 17 - Porcentagem de dias com previsões confiáveis feitas MMS, MMP e MME perante a tendência de viés no posto ID 3182



Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 18 - Porcentagem de dias com previsões confiáveis feitas MMS, MMP e MME perante a tendência de viés no posto ID 2562



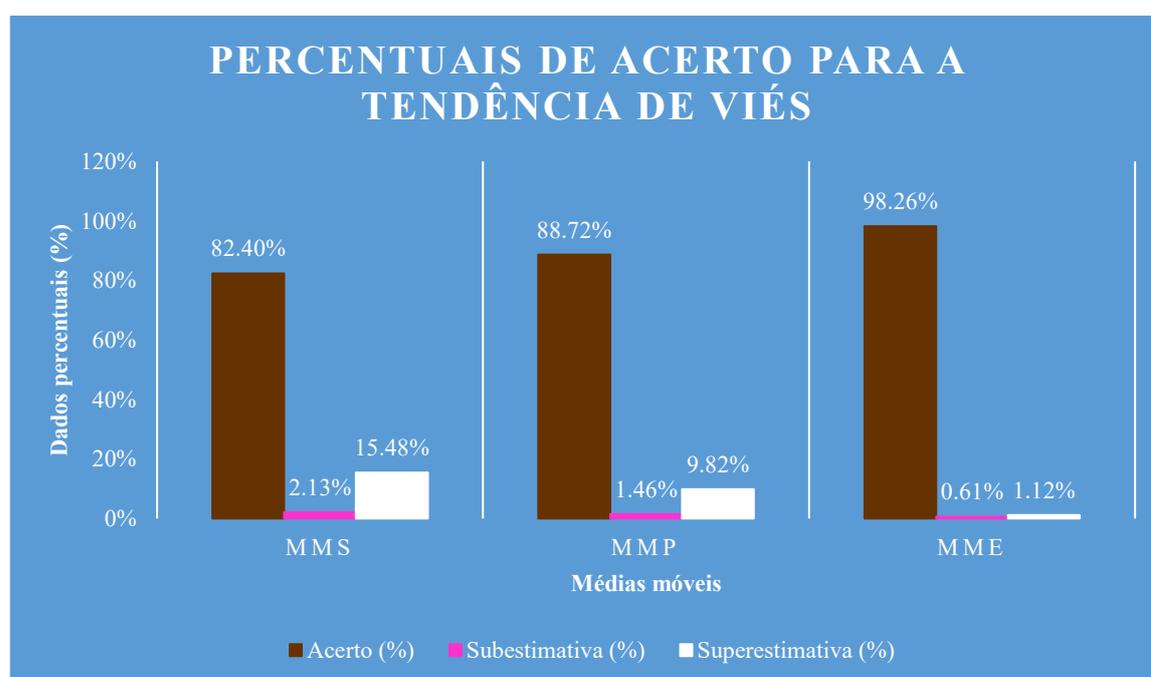
Fonte: O autor (2023).

Esses dados apontam para o fato de que a média móvel com exponencial suavizada produziu os melhores resultados nos 4 postos fluviométricos. A estação ID 2562 foi aquela em que o melhor percentual foi obtido (quase 80% dos dias do período tiveram previsões confiáveis a partir de MME). Nas demais estações esse percentual se manteve razoavelmente próximo a 75%.

Em todos os postos, observa-se a mesma caracterização: MMS apresenta os piores resultados, MMP é o modelo intermediário e MME se revela o mais eficiente e também aquele com os resultados mais destoantes. Nos 4 casos, MMS e MMP sempre retornaram porcentagens de acerto inferiores a 50%, ou seja, muito baixas, o que configura um cenário muito diferente daquele observado nas simulações de MME.

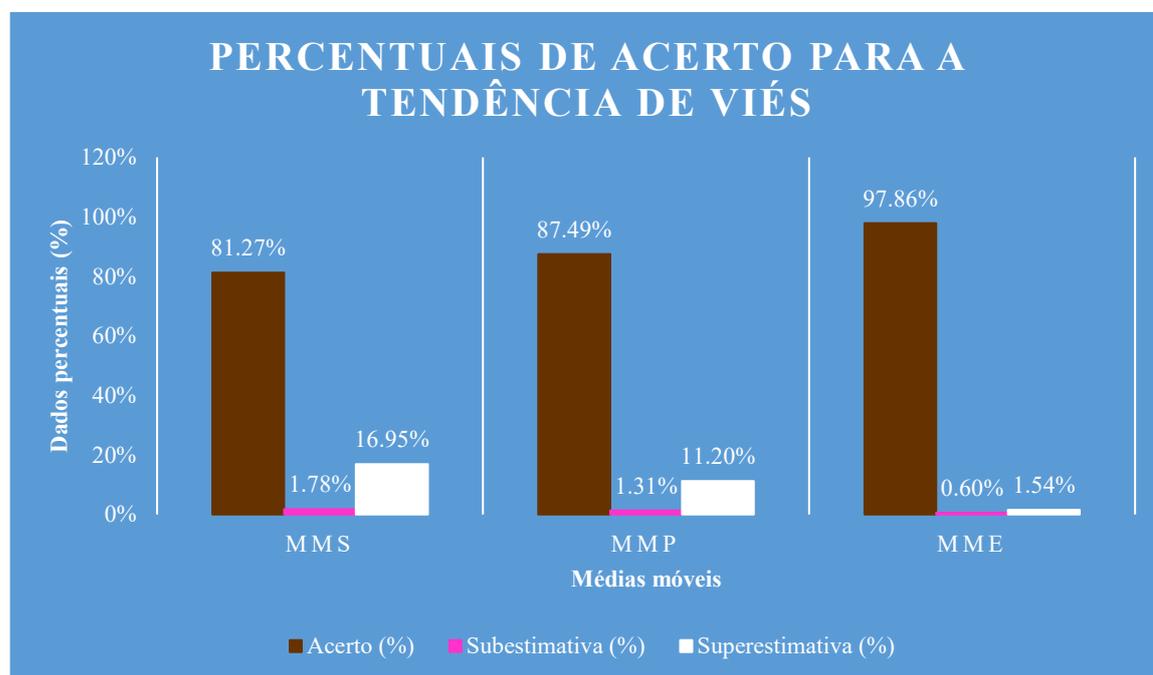
Também foi feita a contagem individual do número de simulações aceitáveis calculadas através de cada um dos métodos. Assim foram determinados os percentuais de acerto, ou seja, quando $-4 < TSm < 4$, de subestimativa, para $TSm > 4$, e de superestimativa, para $TSm < -4$. Todos esses dados seguem à disposição nos gráficos numerados de 19 a 22.

GRÁFICO 19 - Porcentagem de acerto de MMS, MMP e MME para a tendência de viés no posto ID 3161



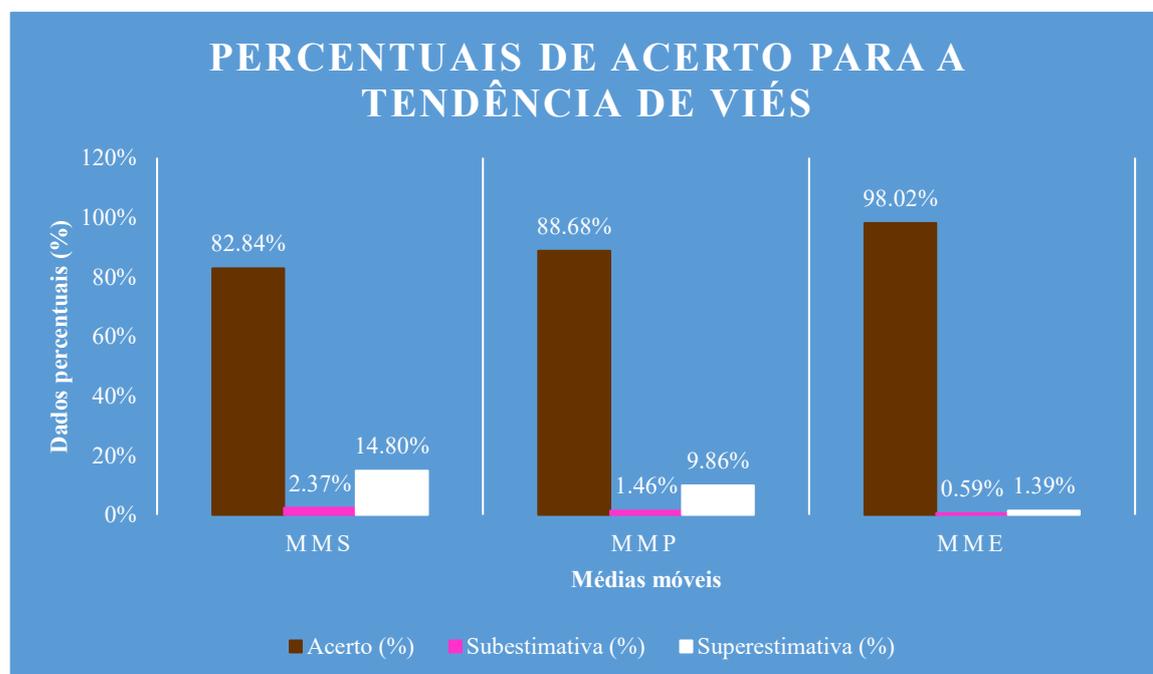
Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 20 - Porcentagem de acerto de MMS, MMP e MME para a tendência de viés no posto ID 3167



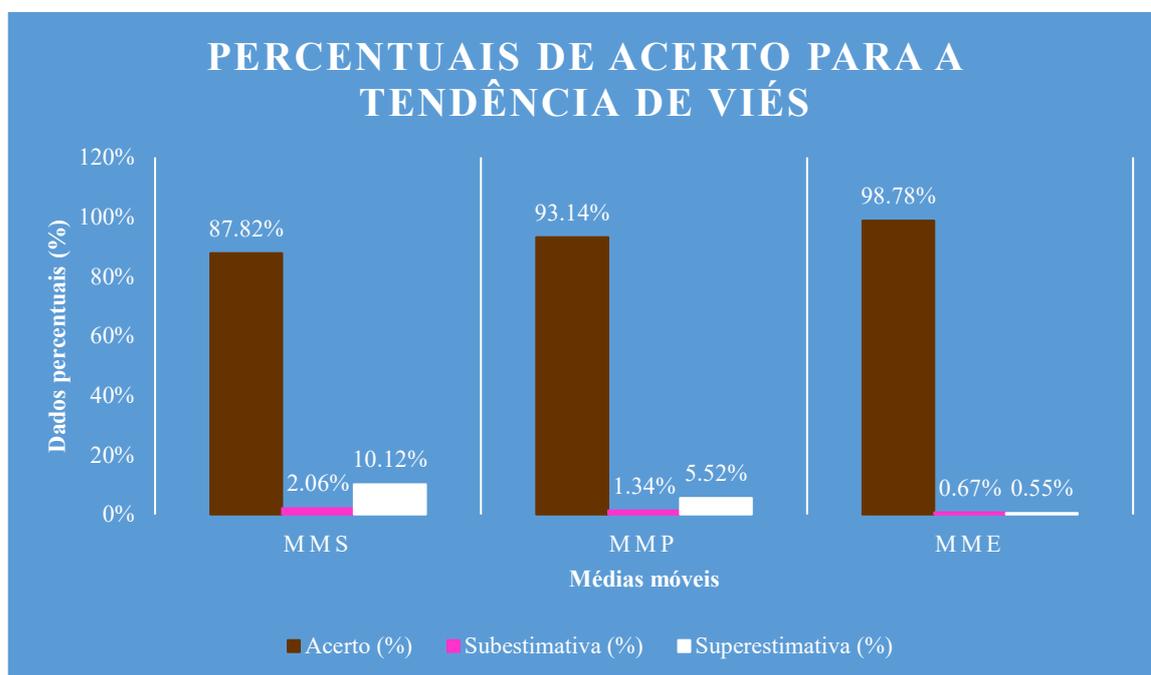
Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 21 - Porcentagem de acerto de MMS, MMP e MME para a tendência de viés no posto ID 3182



Fonte: O autor (2023).

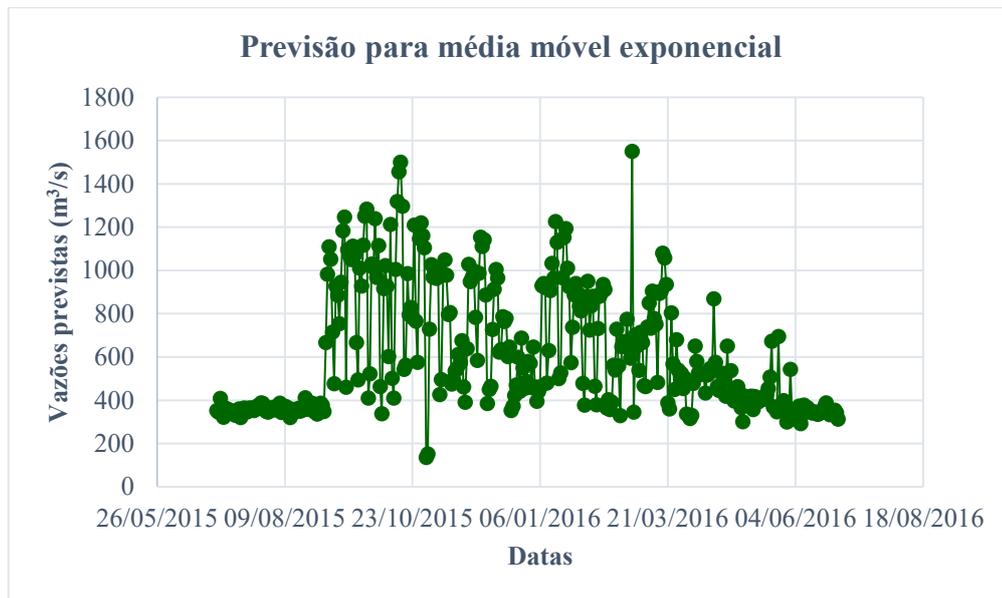
GRÁFICO 22 - Porcentagem de acerto de MMS, MMP e MME para a tendência de viés no posto ID 2562



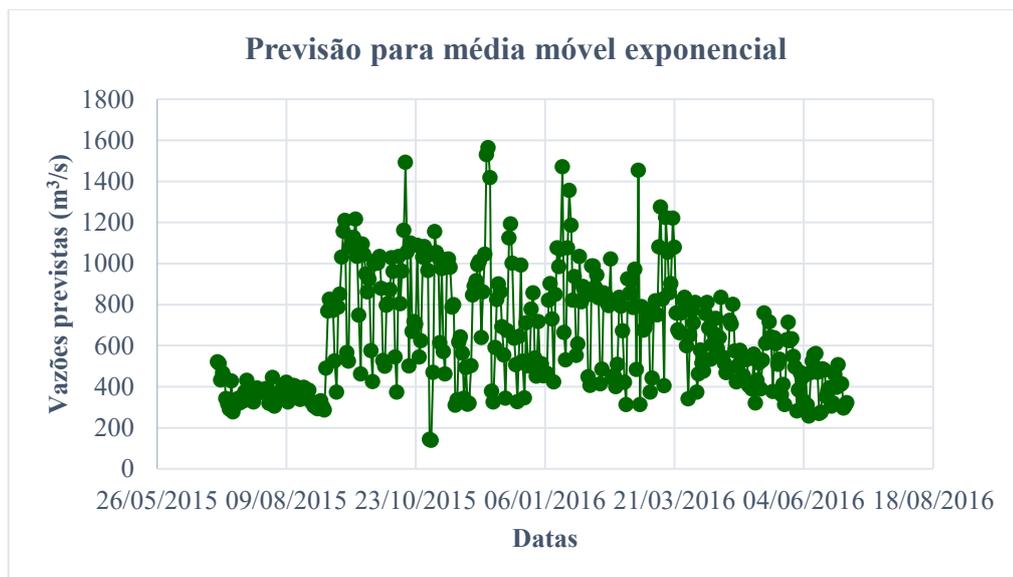
Fonte: O autor (2023).

Naturalmente nota-se que, em todos os postos, a porcentagem de acertos é notoriamente maior para a média móvel com exponencial suavizada, sendo também o menor destaque sempre relacionado à média móvel simples. Enfim, MME apresenta resultados bons, tendo tido acerto em torno de 98% das verificações de simulação segundo a análise de tendência de viés em todas as estações. Portanto, o modelo escolhido foi MME, e os resultados gráficos das simulações estatísticas segundo esse modelo estão nos gráficos 23 e 24.

GRÁFICO 23 - Simulações de previsão por média móvel para o posto (a) ID 3161 e (b) ID 3167, com MME



(a)



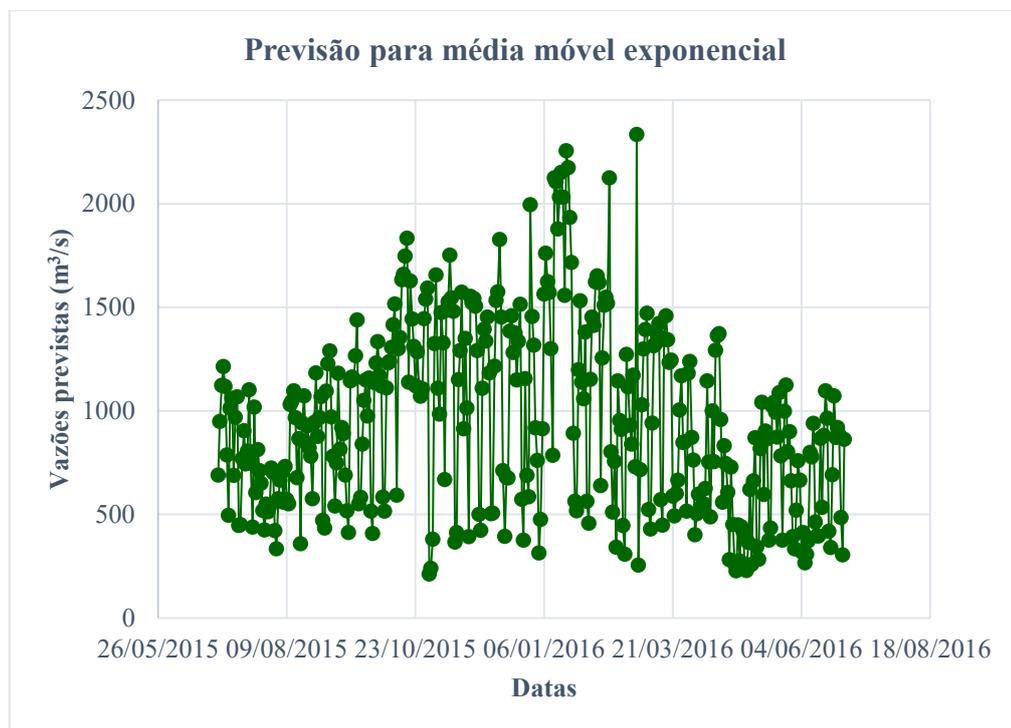
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 24 - Simulações de previsão por média móvel para o posto (a) ID 3182 e (b) ID 2562, com MME



(a)



(b)

Fonte: O autor (2023).

Ainda foi elaborada uma análise das simulações feitas para 3 datas em cada um dos 4 postos. Tais datas foram selecionadas da seguinte forma: cada dia do período analisado, ou seja, de 30/06/2015 a 29/06/2016 foram numerados sequencialmente, de maneira que 30/06/2015 fosse a data 1.

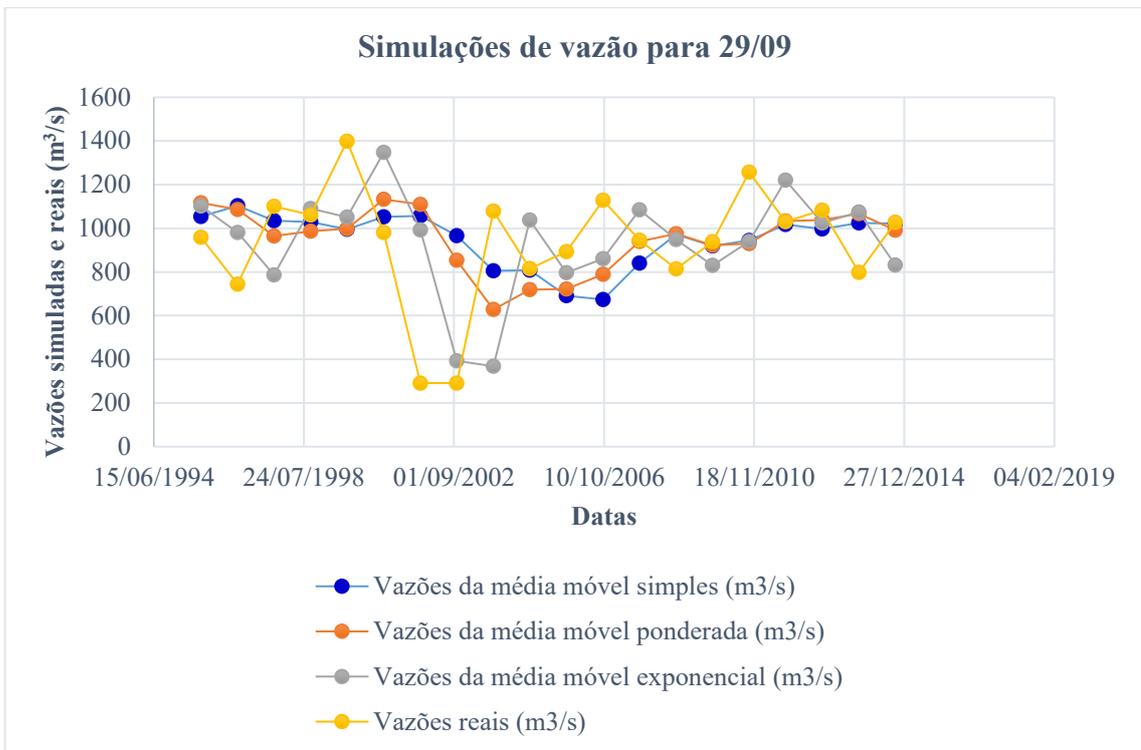
Em sequência, 01/07/2015 foi numerada como 2, 02/07/2015 como 3, até que se chegasse à posição 366 em 29/06/2016. Então, os quartis 25%, 50% e 75% dos números naturais de 1 a 366 foram calculados, e as datas cujas numerações mais se aproximaram desses valores determinados foram as escolhidas para a análise.

Esse procedimento visou a evitar uma possível postura enviesada da pesquisa, à medida em que as mesmas datas, selecionadas segundo um processo puramente matemático, fossem verificadas em todas as estações fluviométricas, garantindo assim uma análise honesta.

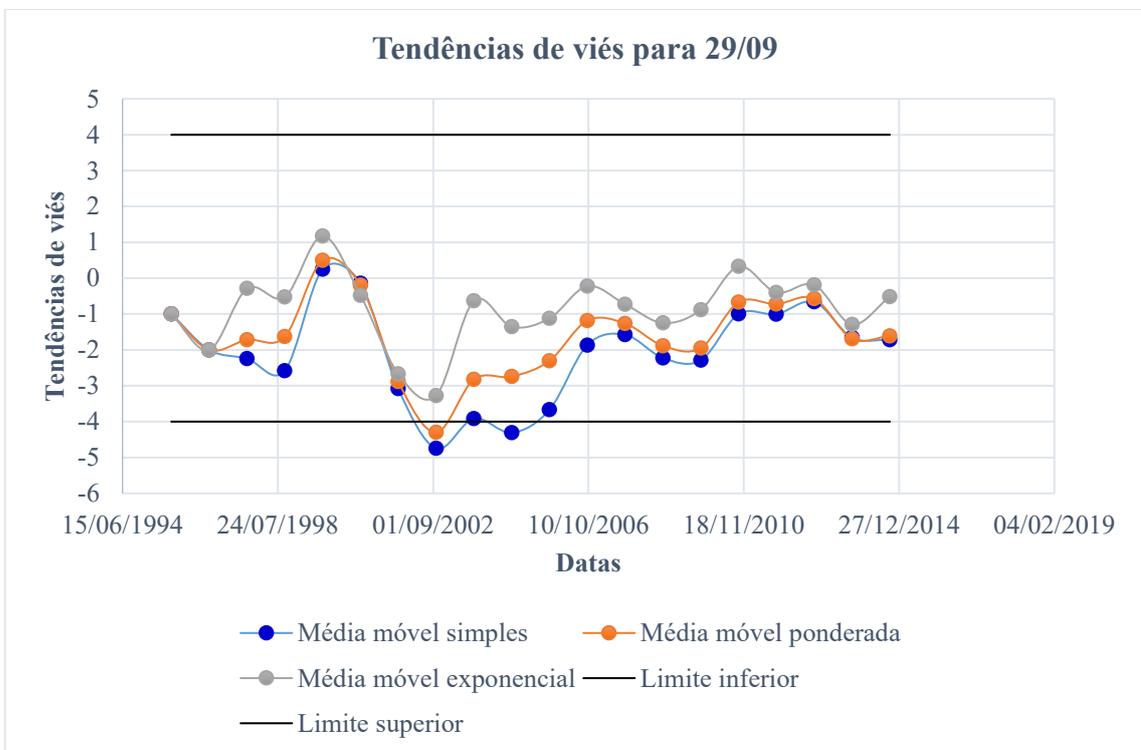
Neste cenário, os gráficos de 25 a 27 representam os resultados das simulações feitas para as datas mencionadas através dos três métodos de média móvel na estação ID 3161. Essas simulações foram comparadas com a série real de dados observados desde o ano de 1995, o ano em que figuram as primeiras simulações, haja vista que foi adotado o período 5 para a média móvel, de maneira que 1990, 1991, 1992, 1993 e 1994 não dispõem de dados anteriores suficientes para que sejam calculadas vazões simuladas.

As estimativas feitas através dos modelos MMS e MMP nos 4 postos constam no Apêndice C deste trabalho, bem como os gráficos com os resultados das simulações das datas 29/09, 29/12 e 30/03.

GRÁFICO 25 - (a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 29/09 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3161



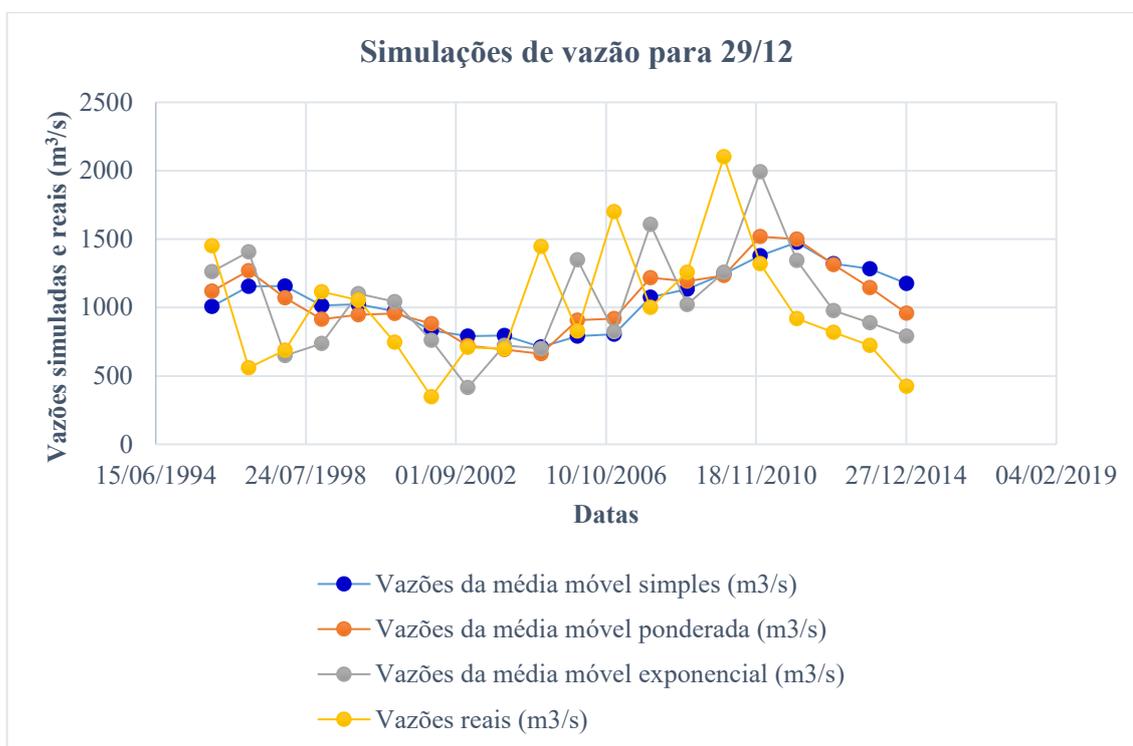
(a)



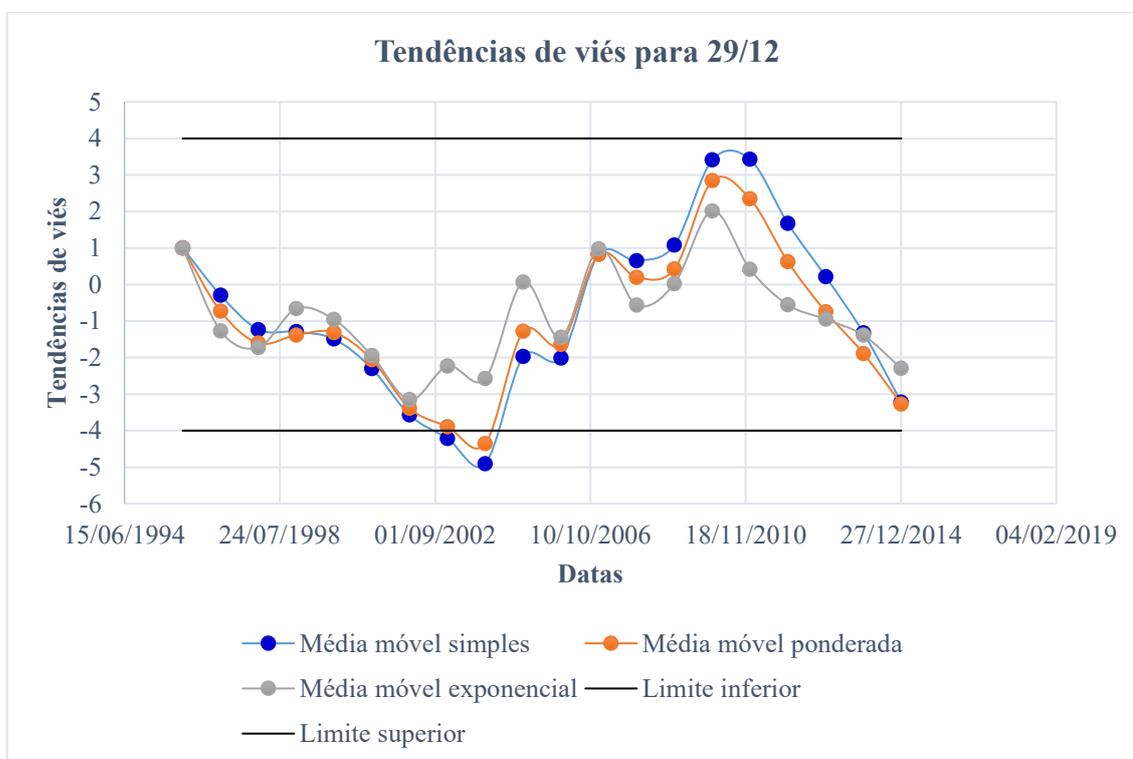
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 26 - (a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 29/12 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3161



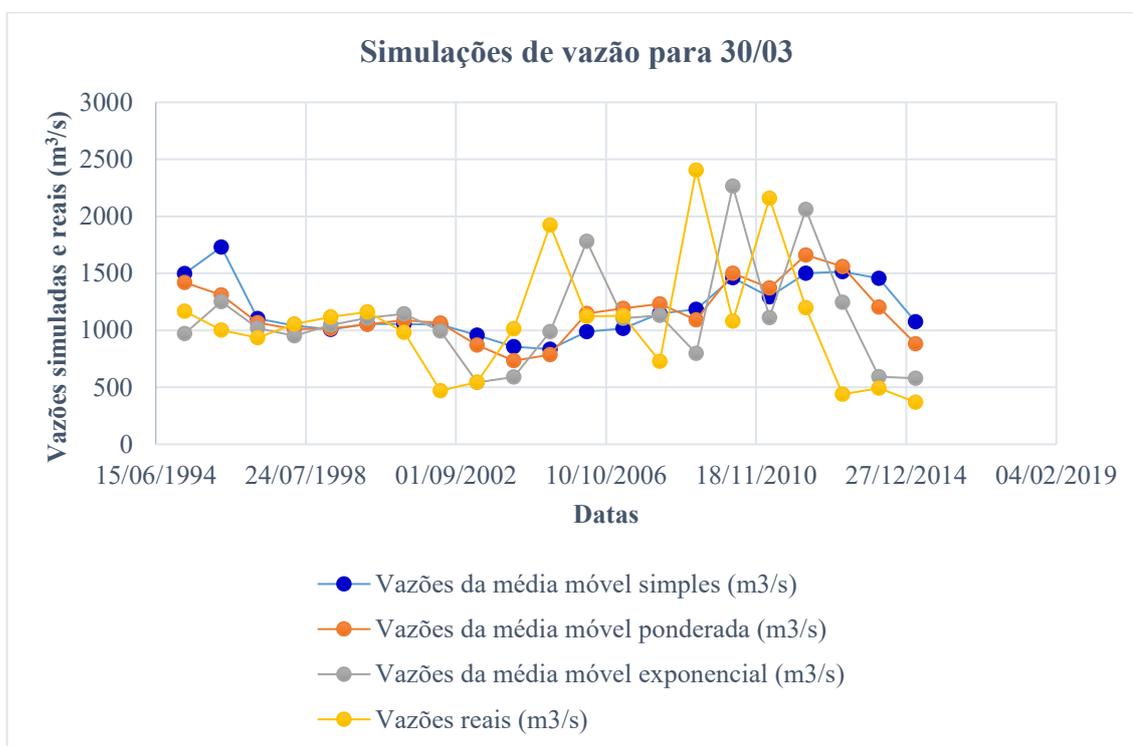
(a)



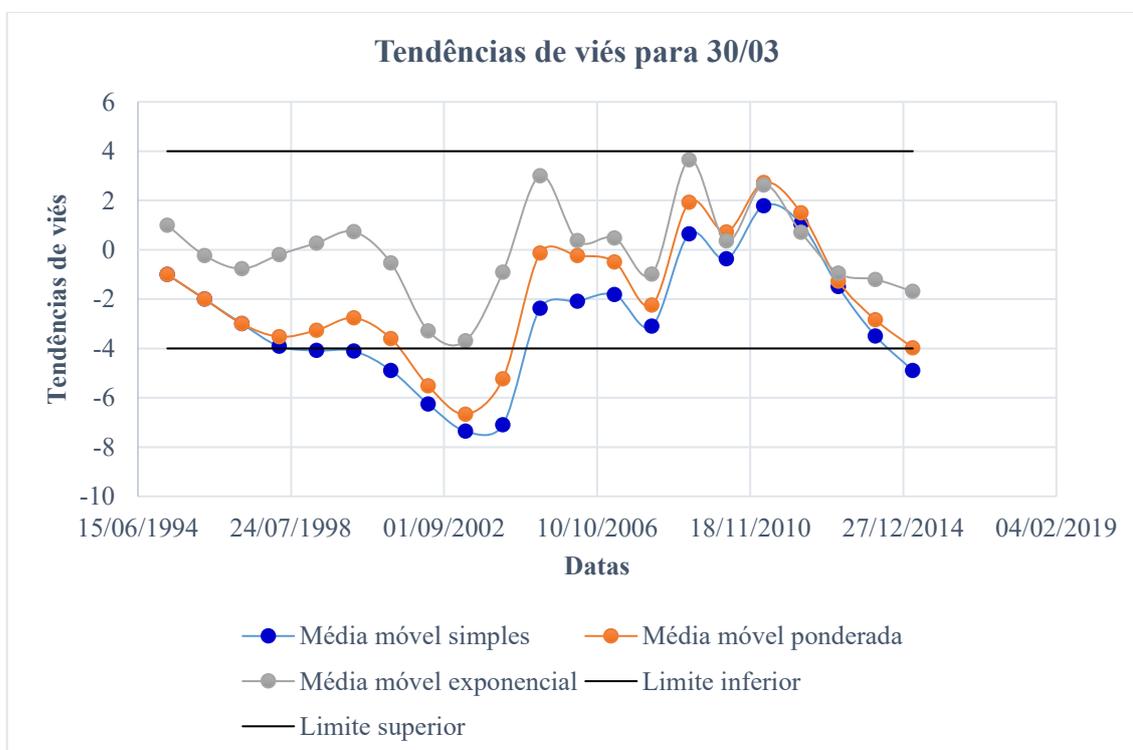
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 27 - (a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 30/03 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3161



(a)



(b)

Fonte: O autor (2023).

Todos esses gráficos deixam claro que a simulação gerada a partir da média móvel com exponencial suavizada é a que mais se aproxima da série de vazões observadas, reforçando o que os resultados anteriores já haviam demonstrado. Além disso, nas análises da tendência de viés, MME é notavelmente a opção que menos escapa aos limites pré-estabelecidos de -4 para mínimo e 4 para máximo.

No que diz respeito à proximidade entre as simulações e a série temporal real, é facilmente constatável que especialmente em relação aos picos e baixas de vazões, MME é a média móvel que melhor os representa, ainda que sejam comuns alguns atrasos nessa representação. Ao mesmo tempo, é perceptível que MMS e MMP geraram, em todas as estações, simulações razoavelmente parecidas entre si e não representam muito bem a série real.

Quanto às verificações da tendência de viés, nota-se que, nas 3 datas analisadas para os 4 postos fluviométricos, MMS e MMP geram curvas que escapam aos limites mínimo e máximo desejáveis, sendo que MMS revela defasagens mais significativas que as de MMP.

Simultaneamente, MME mostra resultados satisfatórios em todos os casos verificados, ou seja, para esta média móvel, os dias 29/09/2015, 29/12/2015 e 30/03/2016 possuem previsões confiáveis nas 4 estações, enquanto que nenhuma dessas datas apresenta dados de previsão críveis calculados segundo as demais opções de média móvel.

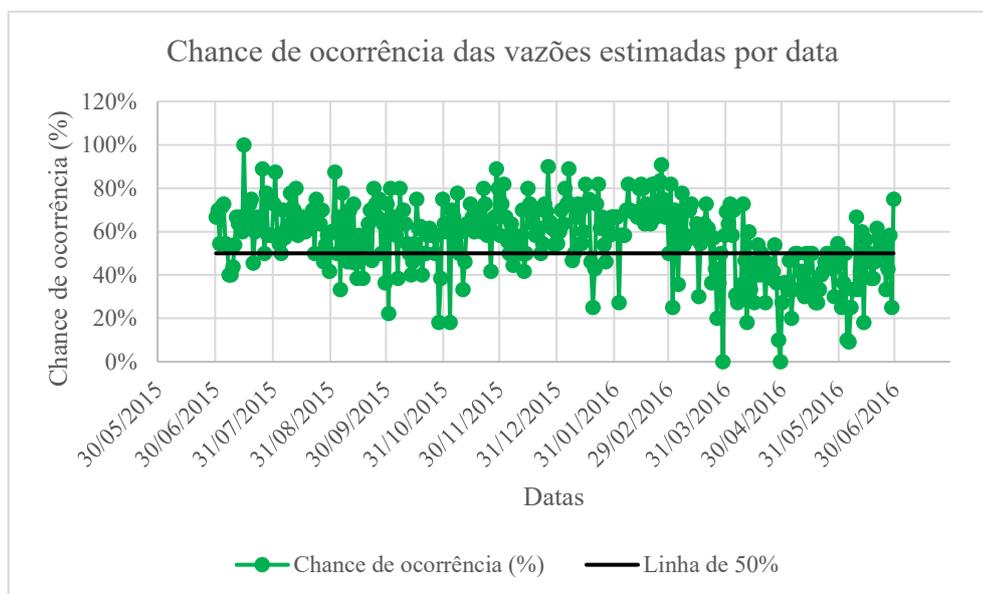
Contudo, deve ser destacado que a satisfatoriedade dos resultados gerados é apenas matemática e estatisticamente verificada. Quando se observam as vazões simuladas através de MME em comparação às vazões observadas, percebe-se que os atrasos gerados pela simulação geram problemas na confiabilidade dos dados calculados, especialmente nos picos e nas depressões dos hidrogramas, onde tendem a ser verificadas diferenças muito grandes entre as vazões simuladas e medidas.

5.4 CÁLCULO DE PROBABILIDADES COM CADEIAS DE MARKOV PARA AS ESTIMATIVAS DA MÉDIA MÓVEL ESCOLHIDA

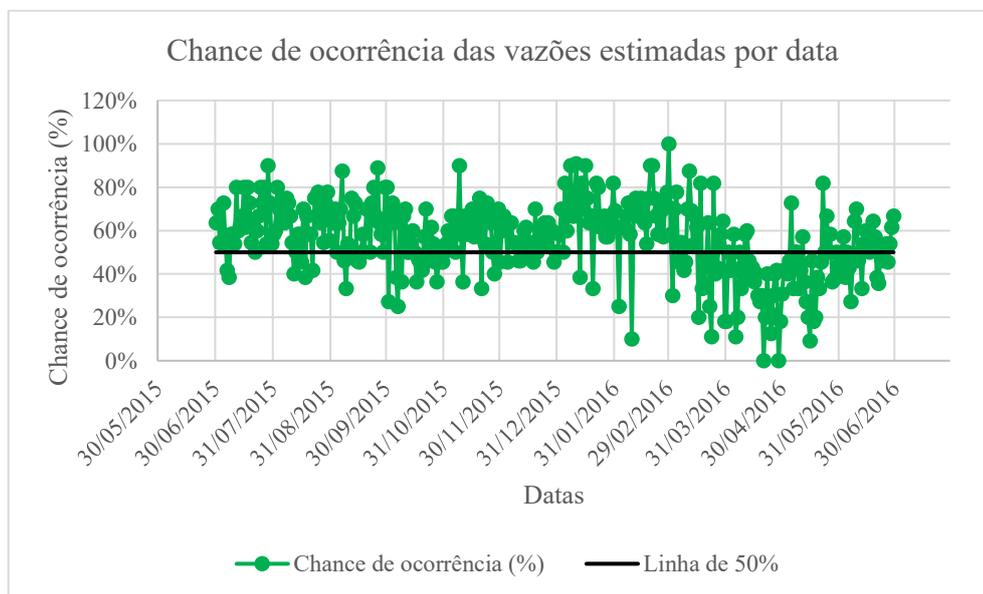
Os gráficos 28 e 29 revelam os percentuais de chance de ocorrência das estimativas feitas com MME para cada uma das datas no período de 30/06/2015 a 29/06/2016. Todos os valores

mostrados são comparados graficamente à linha constante do percentual 50%, o que facilita a percepção de regiões com maiores concentrações de dados acima e abaixo desse valor.

GRÁFICO 28 - Porcentagens de ocorrência das estimativas com MME para as estações (a) ID 3161 e (b) ID 3167



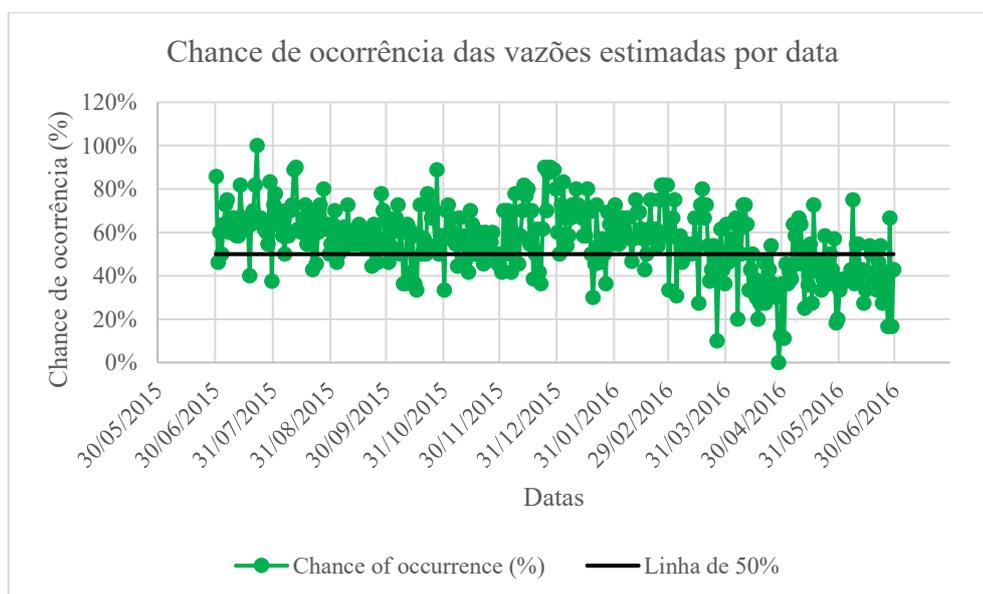
(a)



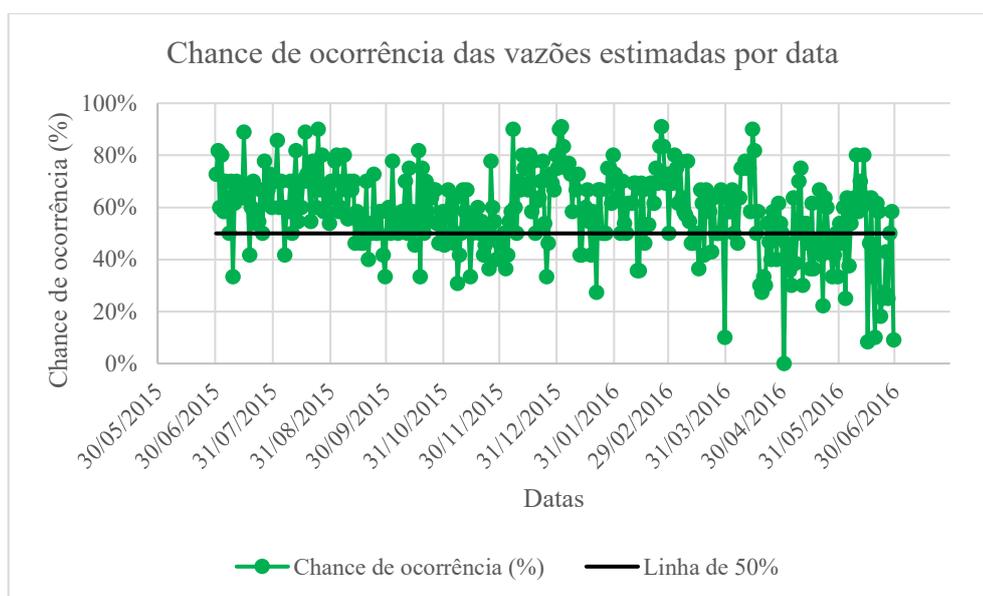
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 29 - Porcentagens de ocorrência das estimativas com MME para as estações (a) ID 3182 e (b) ID 2562



(a)



(b)

Fonte: O autor (2023).

Os gráficos mostram que os 4 postos guardam uma razoável semelhança nos resultados probabilísticos, estando o posto ID 2562 um pouco mais destoante que os demais. Em geral, as datas dos meses de abril e maio tendem a apresentar menores percentuais, o que não se repete em ID 2562. Contudo, para as 4 estações existe um grande número de datas com percentuais superiores a 50% de chance de ocorrência da estimativa exclusivamente conforme as variações sofridas pelas vazões ao longo de cada série temporal.

Existem raros casos em que a probabilidade calculada foi de 0%, significando que a sucessão final de variações imposta pela média móvel quando da estimativa não foi contabilizada nenhuma vez entre as variações certas, ou seja, aquelas em que as vazões foram de fato observadas, e não estimadas.

O que estes dados indicam é que nos 4 postos existem muitas estimativas de vazões cujas probabilidades de ocorrência segundo as cadeias de Markov figuram na faixa de 60% a 80%. Portanto, de maneira geral, pode-se admitir que a análise probabilística mostra que as estimativas de vazão feitas através de MME possuem chances relativamente altas de se concretizarem de acordo com as variações de vazão já observadas nas séries temporais.

5.5 RESULTADOS DOS TESTES ESTATÍSTICOS PARA AS SÉRIES TEMPORAIS DE VAZÃO POR DATAS

A Tabela 11 carrega os resultados dos testes estatísticos de Mann-Kendall, Pettit e *t* de *student* aplicados às séries temporais de dados de vazão separadas por datas. Os percentuais dados na tabela funcionam de acordo com o seguinte exemplo, referente ao posto ID 3161: 5,74% das séries datadas apresentaram tendência de acordo com o teste de Mann-Kendall; 94,26% das mesmas séries não apresentam tendência; em 74,04% das séries S é um valor negativo; em 0,55% S é um valor nulo; em 25,41% é um valor positivo; 3,01% das séries apresentam *changing-point*; 96,99% das séries não apresentam *changing-point*; 1,09% das séries possuem diferenças significativas entre as médias de vazões da primeira e da segunda metade do período; 98,91% das séries não possuem diferença significativas entre essas médias; em 58,47% dos casos a média da segunda metade é inferior à média da primeira metade; em nenhum dos casos as médias se igualam; em 41,53% dos casos a média da segunda metade é superior à média da primeira metade.

Tabela 11. Dados percentuais obtidos a partir dos testes estatísticos.

Características	ID 3161	ID 3167	ID 3182	ID 2562
Com tendência	5,74%	8,20%	18,03%	11,20%
Sem tendência	94,26%	91,80%	81,97%	88,80%
$S < 0$	74,04%	83,06%	87,98%	80,87%
$S = 0$	0,55%	0,00%	0,00%	0,82%
$S > 0$	25,41%	16,94%	12,02%	18,31%
Com <i>changing point</i>	3,01%	3,83%	10,66%	7,38%

Sem <i>changing point</i>	96,99%	96,17%	89,34%	92,62%
Diferença significativa nas médias	1,09%	1,64%	3,83%	3,01%
Diferença não significativa nas médias	98,91%	98,36%	96,17%	96,99%
<i>Média 2 < Média 1</i>	58,47%	71,58%	74,04%	68,31%
<i>Média 2 = Média 1</i>	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
<i>Média 2 > Média 1</i>	41,53%	28,42%	25,96%	31,69%

Fonte: O autor (2023).

Os percentuais calculados apontam que, para os 4 postos, são majoritários os casos em que $S < 0$ e em que a média de vazões do segundo período da série temporal foi inferior à média do primeiro período. Isso poderia indicar uma tendência geral de redução nas vazões ao longo do tempo. Contudo, ao se analisarem as demais porcentagens, vê-se que, do mesmo modo em todos os postos, a maior parte das séries temporais não demonstrou nenhuma tendência, de acordo com o teste de Mann-Kendall, bem como não revelou pontos de ruptura no comportamento dos dados registrados (*changing points*), segundo a prova de Pettit, e tampouco apresentou diferenças significativas entre as médias de vazões, conforme o teste *t* de *student*. O Apêndice D contém a distribuição gráfica dos resultados dos testes estatísticos.

5.6 RESULTADOS PARA PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

As tabelas 12 e 13 trazem respectivamente os percentuais acumulados e por intervalo para os dados calculados com base nos quartis, na média (*M*) e no desvio padrão (*DP*).

Tabela 12. Dados percentuais acumulados para os referenciais estatísticos.

Postos	<=Q25	<=Q50	<=Q75	<=M-DP	<=M	<=M+DP
ID 3161	32,79%	50,27%	72,13%	22,13%	52,73%	89,34%
ID 3167	48,63%	68,03%	83,33%	29,78%	69,40%	92,62%
ID 3182	46,45%	68,03%	86,89%	28,69%	70,22%	97,27%
ID 2562	34,97%	66,12%	84,70%	22,13%	66,39%	96,17%

Fonte: O autor (2023).

Na Tabela 12, Q_{25} é o quartil 25%, Q_{50} é o quartil 50%, Q_{75} é o quartil 75%, $M-DP$ é a diferença entre a média e o desvio padrão, M é a média e $M+DP$ a soma da média com o desvio padrão. Sendo assim, na tabela são mostrados os percentuais de séries temporais cujas 3 últimas vazões são inferiores ou iguais ao valor identificado no topo da coluna correspondente.

Tabela 13. Dados percentuais por faixa para os referenciais estatísticos.

Postos	$\leq Q25$	$>Q25$ e $\leq Q50$	$>Q50$ e $\leq Q75$	$\leq M-DP$	$>M-DP$ e $\leq M$	$>M$ e $\leq M+DP$
ID 3161	32,79%	17,49%	21,86%	22,13%	30,60%	36,61%
ID 3167	48,63%	19,40%	15,30%	29,78%	39,62%	23,22%
ID 3182	46,45%	21,58%	18,85%	28,69%	41,53%	27,05%
ID 2562	34,97%	31,15%	18,58%	22,13%	44,26%	29,78%

Fonte: O autor (2023).

Na Tabela 13, a 2ª coluna aponta os percentuais de séries temporais em que as 3 últimas vazões são inferiores ao quartil 25% da série; na 3ª coluna, a faixa estabelecida é de valores superiores ao quartil 25% e inferiores ou iguais ao quartil 50%; na 4ª coluna, superiores ao quartil 50% e inferiores ou iguais ao quartil 75%; na 5ª coluna, inferiores ou iguais à diferença entre a média e o desvio padrão; na 6ª coluna, maiores que a diferença entre a média e o desvio padrão e menores ou iguais à média; na 7ª coluna, menores ou iguais à soma da média com o desvio padrão.

Os dados acumulados mostram que a maior parte das séries temporais por data não possuem nenhuma de suas 3 últimas vazões nas maiores faixas (acima do quartil 75% e da adição da média com o desvio padrão). Os mesmos dados também revelam que mais da metade das séries temporais de datas em todos os postos têm suas 3 últimas vazões abaixo da mediana e da média do conjunto.

De acordo com os dados separados por faixa, a maioria das séries temporais de datas possui as 3 últimas vazões abaixo do quartil 25% e situadas na faixa entre a diferença entre a média e o desvio padrão e a média, com exceção do posto ID 3161. Nessa estação, apesar de a maior parte das séries conterem as 3 vazões finais dentre as 25% menores, na maioria dos casos, a tríade figura entre a média e a soma da média com o desvio padrão.

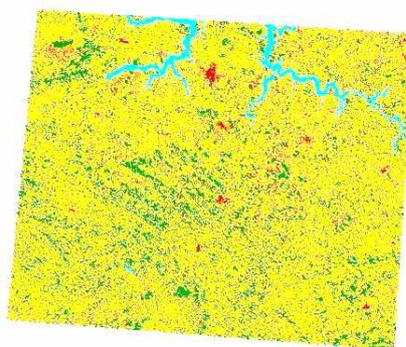
Desse modo, verifica-se que as 3 últimas vazões das séries temporais subdivididas em datas tendem a não aparecer como as maiores vazões das séries. Se o teste de Mann-Kendall apontasse a existência de tendência na maior parte dos casos, o que de fato não ocorreu, sabendo-se que o valor S do referido teste foi calculado como negativo na maioria das séries, poder-se-ia considerar que a análise segundo parâmetros estatísticos revelaria uma tendência majoritária à redução das vazões ao longo do tempo.

Entretanto, como isso não se deu, e tampouco foi registrada uma quantidade expressiva de séries temporais com pontos de ruptura e/ou com diferenças de grade significância entre as médias de vazões dos períodos, pode-se dizer que a presente análise, em complemento aos testes estatísticos, não conclui a existência de nenhuma tendência ou mudança expressiva no regime de vazões ao longo do período avaliado.

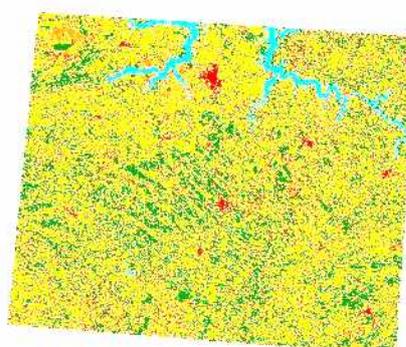
5.7 MAPAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA DO RIO GRANDE

As figuras 17, 18 e 19 revelam os mapas de uso e ocupação do solo respectivamente para as regiões delimitadas 1, 2 e 3, nos anos de 1995, 2005 e 2015. Todas as imagens apresentadas nas figuras são camadas *raster* organizadas na projeção de coordenadas UTM (métricas) EPSG: 31982, ou seja, para a zona 22S, da qual faz parte a bacia do Rio Grande.

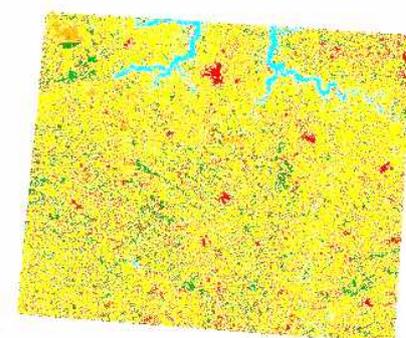
FIGURA 17 - Mapas de uso e ocupação do solo para a região 1 em (a) 1995, (b) 2005 e (c) 2015



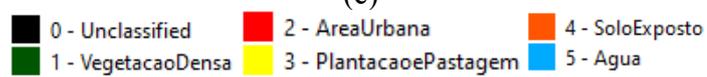
(a)



(b)

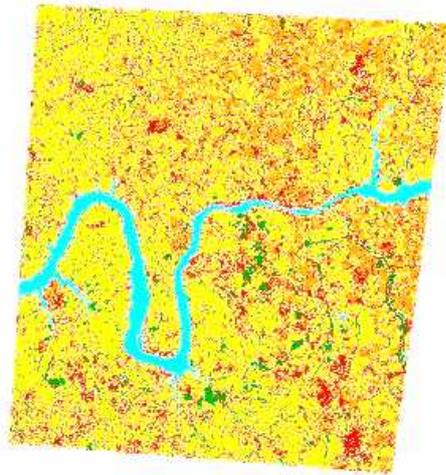


(c)

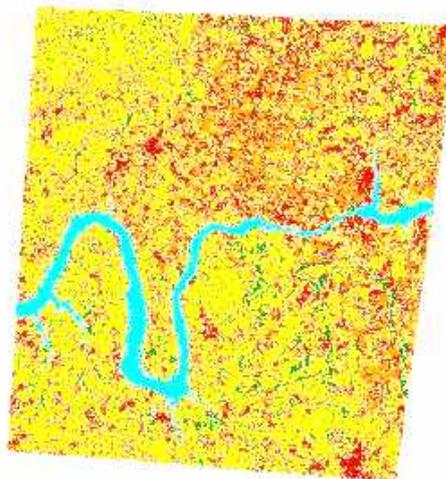


Fonte: O autor (2023).

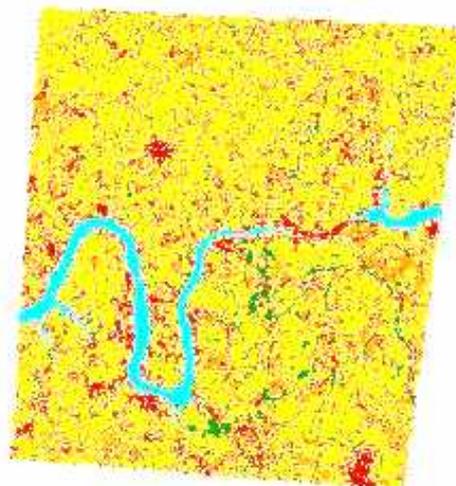
FIGURA 18 - Mapas de uso e ocupação do solo para a região 2 em (a) 1995, (b) 2005 e (c) 2015



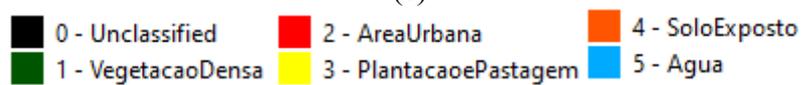
(a)



(b)

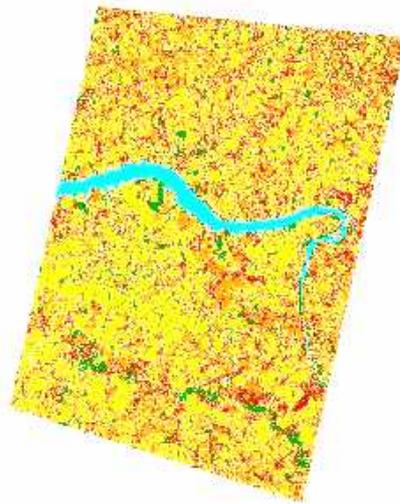


(c)

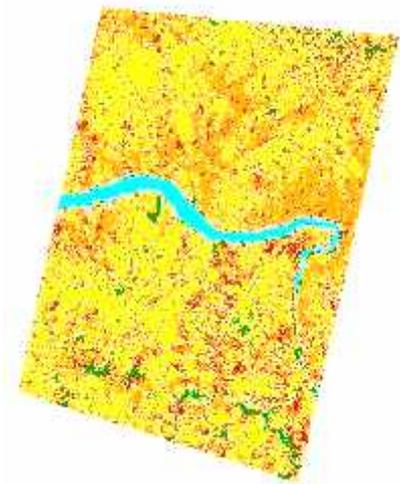


Fonte: O autor (2023).

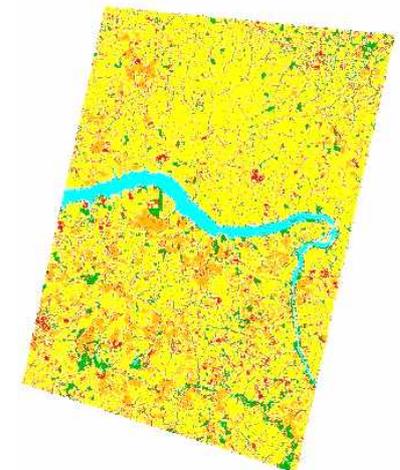
FIGURA 19 - Mapas de uso e ocupação do solo para a região 3 em (a) 1995, (b) 2005 e (c) 2015



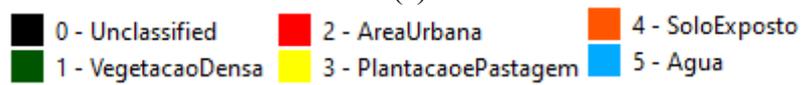
(a)



(b)



(c)



Fonte: O autor (2023).

O que mais se destaca nas imagens, com relação especialmente às regiões 2 e 3, é a transição entre áreas de plantação e pastagem e solo exposto. É notável que em 2015 havia muito menos áreas de solo exposto do que em 1995 e 2005 nas regiões 2 e 3, estando claro que muitas áreas com solo exposto em 1995 e 2005 se tornaram áreas com plantações ou com pastagens em 2015.

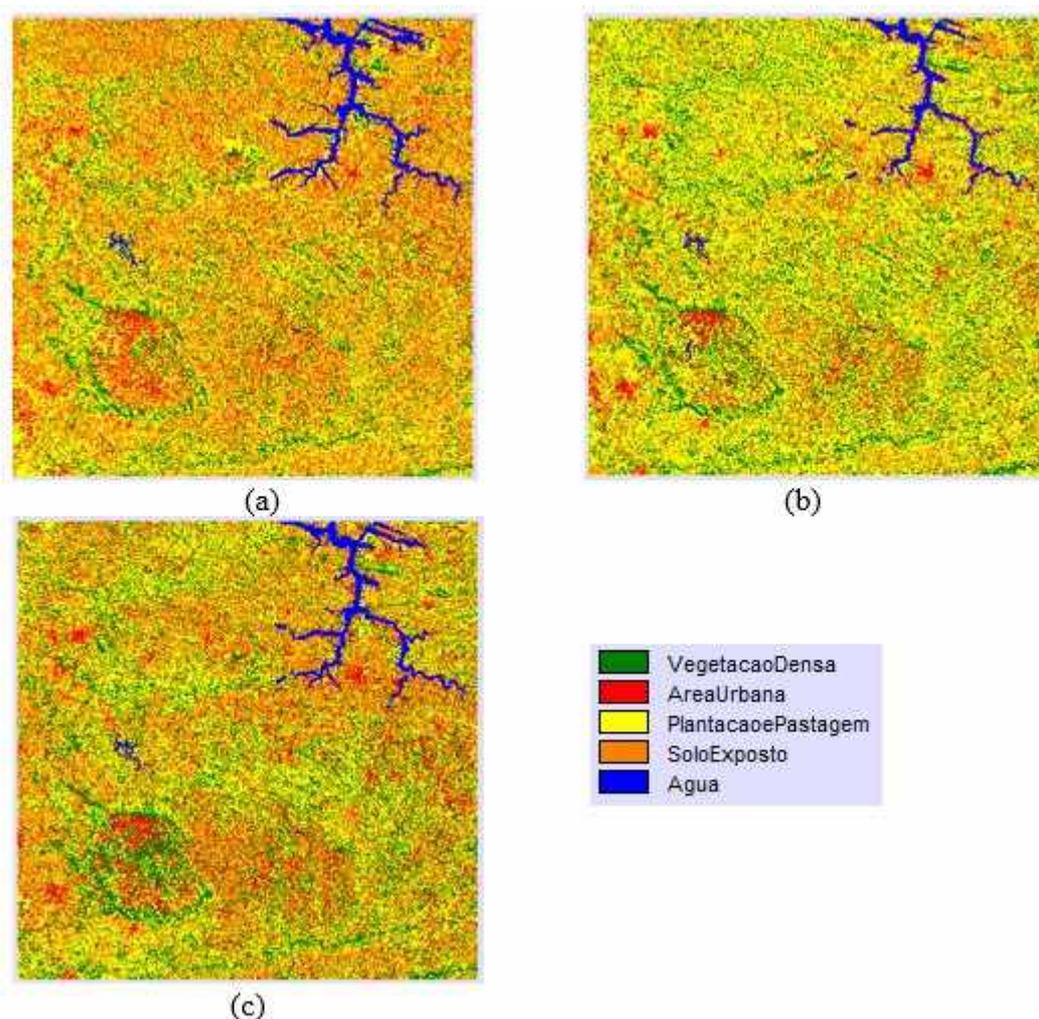
Segundo Ribeiro *et al.* (2017), a alternância entre solo exposto e áreas de plantação é comum, uma vez que entre os períodos de colheita e do novo plantio, o solo é mantido exposto. Portanto, pode-se considerar que não houve mudanças significativas nesse sentido, haja vista que as diferenças entre solo exposto e áreas com plantação e pastagem provavelmente se originam do fato de as imagens de 1995 e 2005 terem sido obtidas quando muitas áreas estavam entre a colheita e o plantio, ao passo que as imagens de 2015 foram captadas em uma época do ano em que a maior parte das mesmas áreas não havia passado pela colheita ou já haviam transcorrido o plantio.

Nas 3 regiões analisadas é possível perceber que houve uma tendência de redução das áreas com vegetação densa, já que os mapas de 2015 mostram manchas menores e em menor quantidade na cor correspondente. Ainda assim, as diferenças não são gritantes. Nota-se o decaimento da vegetação, mas existe uma preservação razoável das áreas. Finalmente, não houve mudanças impactantes nas áreas urbanas.

5.8 PREVISÕES DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

As Figuras 20, 21, 22 e 23 mostram respectivamente os mapas de ocupação do solo elaborados para a área leste nos anos de 1995, 2015 e 2020, o mapa de mudanças no uso do solo de acordo com a verificação no período de 1995 a 2015, a comparação entre o mapa real de 2020 e o mapa de previsão, seguidos pelo mapa de validação, e finalmente as previsões de uso do solo em 2025 e 2035. Todas as imagens estão na projeção EPSG: 32623, com coordenadas UTM, assim como as bandas originais baixadas.

FIGURA 20 - Mapas de uso e ocupação do solo para a área leste em (a) 1995, (b) 2015 e (c) 2020



Fonte: O autor (2023).

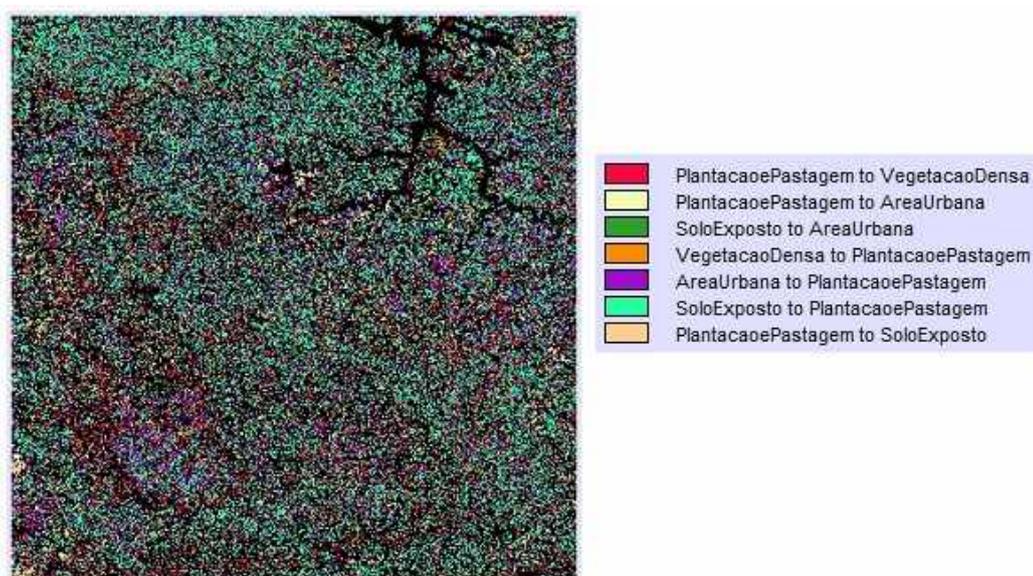
Apesar de os mapas tenderem a superestimar as áreas urbanas, eles são capazes de gerar boas representações da realidade de uso e ocupação do solo na área leste selecionada. A superestimativa das manchas urbanas provavelmente se deve ao fato de que, por se tratar de uma área grande, com alta variabilidade de coloração de solos expostos mostrada nas bandas, regiões cuja coloração do solo é próxima àquela encontrada nas áreas urbanas são erroneamente identificadas como pequenas manchas urbanas dispersas.

Contudo, em linhas gerais os modelos criados mostram a grande prevalência da atividade agropecuária, com muitas áreas de plantações e pastagens, que se alternam com solo exposto ao longo do tempo, devido à dinâmica de plantio e colheita (RIBEIRO *et al.*, 2017). Em 1995

havia muitas áreas com solo exposto, sendo que em 2015 a vasta maioria se encontrava sob cultivo, e já em 2015 se revelava um cenário intermediário.

Em comparação com a área total, as manchas urbanas são razoavelmente estáveis e não representam áreas tão consideráveis no todo. As áreas com vegetação nativa e densa são pequenas e espalhadas pela extensão da área leste, não apresentando mudanças expressivas na linha temporal. Dessa forma, o cenário verificado entre 1995 e 2015, alongando-se até 2015 pode ser visto como estável, sem mudanças severas no uso do solo.

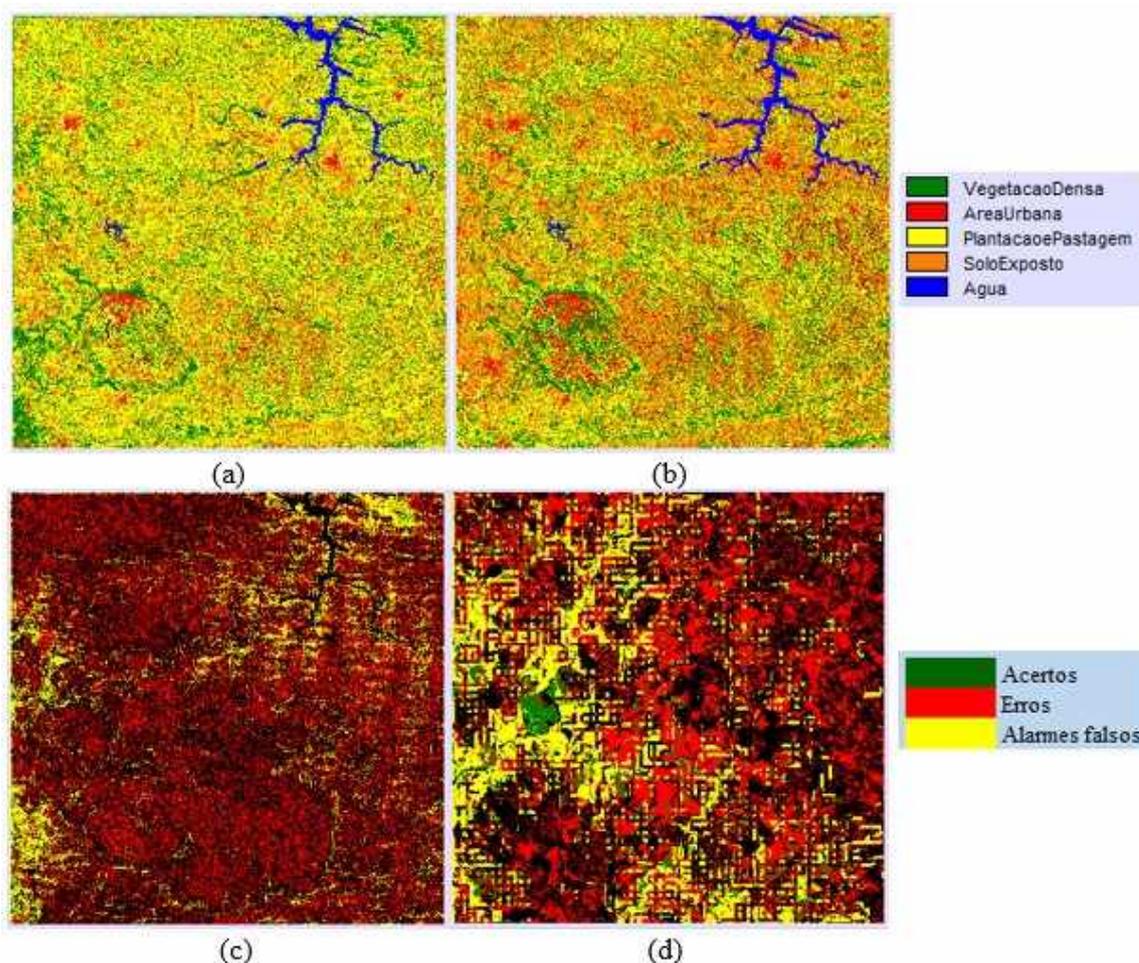
FIGURA 21 - Mapa de mudanças verificadas na área leste entre 1995 e 2015



Fonte: O autor (2023).

Como era esperado, a alteração predominante entre 1995 e 2015 foi a mudança de solo exposto para plantações e pastagens, indicando a periodicidade das atividades agropecuárias. Devido à superestimativa das áreas urbanas, o modelo considerou algumas regiões de transição de área urbana para plantações e pastagens. Essa transição é improvável e possivelmente se deve ao fato de áreas de solo exposto convertidas em áreas de cultivo terem sido equivocadamente entendidas como áreas urbanas. A transição de plantações e pastagens para vegetação densa também é bastante improvável. Contudo, suas indicações são muito pequenas e, portanto, não causam preocupações.

FIGURA 22 - Área leste: (a) Projeção para o ano de 2020, (b) mapa real do ano de 2020, (c) mapa de validação e (d) detalhe do mapa de validação



Fonte: O autor (2023).

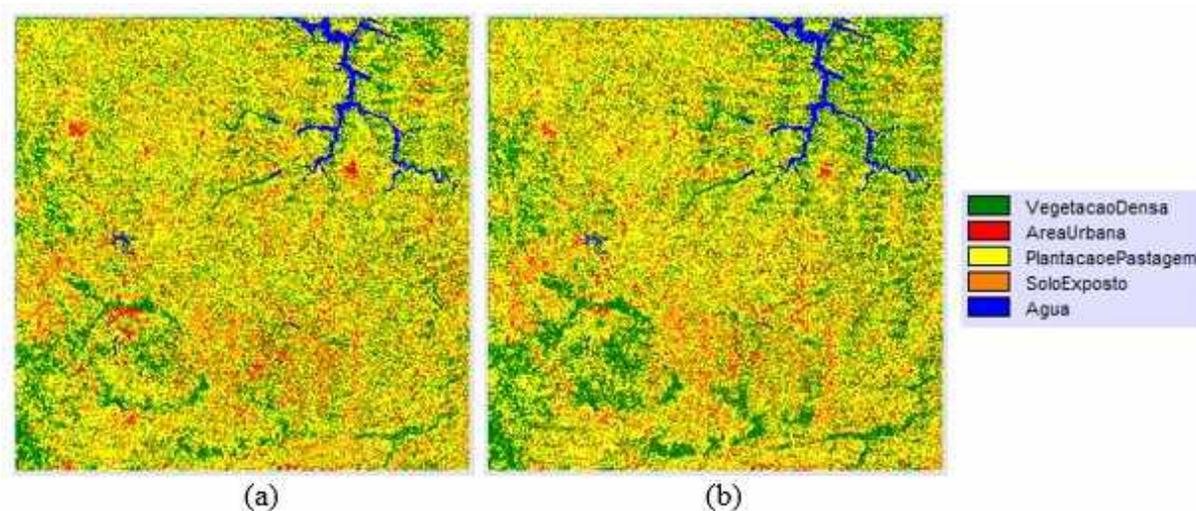
A principal divergência que se nota entre a projeção e o mapa real de 2020 para a área leste é justamente a presença maior de solo exposto no mapa real, o que é compreensível, dado que as imagens de 2015 revelaram muito mais áreas de plantação e pastagem do que aquelas de 1995. Logo, a tendência majoritariamente verificada foi a de conversão de solo exposto em terrenos sob cultivo, o que levou à projeção de poucas regiões de solo exposto. Contudo, deve-se reforçar que a indicação da grande predominância da atividade agropecuária se mantém consistente. Houve também uma tendência de superestimativa da vegetação nativa nos cantos nordeste e sudoeste, bem como ao longo da borda oeste.

A validação da projeção mostrou muitas áreas de erros concentradas, com pequenas regiões de acerto dispersas por todo o mapa, o que pode ser melhor percebido através do detalhe. Grande parte dos erros encontrados provavelmente se deve às divergências já pontuadas entre

solo exposto e solo sob cultivo. O fator determinante da validação não é em si a quantidade de acertos ser maior ou menor que a de erros, mas sim, as transições que foram previstas corretamente (BORGES, 2020).

Neste caso, houve acertos na projeção de passagens de solos expostos e plantações e pastagens para áreas urbanas, indicando alguma expansão das cidades, ainda que não tão expressiva. Também houve acertos nas transições de vegetação nativa para plantação e pastagem, de solo exposto para plantação e pastagem e de plantação e pastagem para solo exposto. As transições improváveis de plantação e pastagem para vegetação nativa densa e de área urbana para plantação e pastagem possivelmente se devem às superestimativas de áreas urbanas e de vegetação nativa.

FIGURA 23 - Área leste: (a) Projeções para os anos de 2025 e (b) 2035

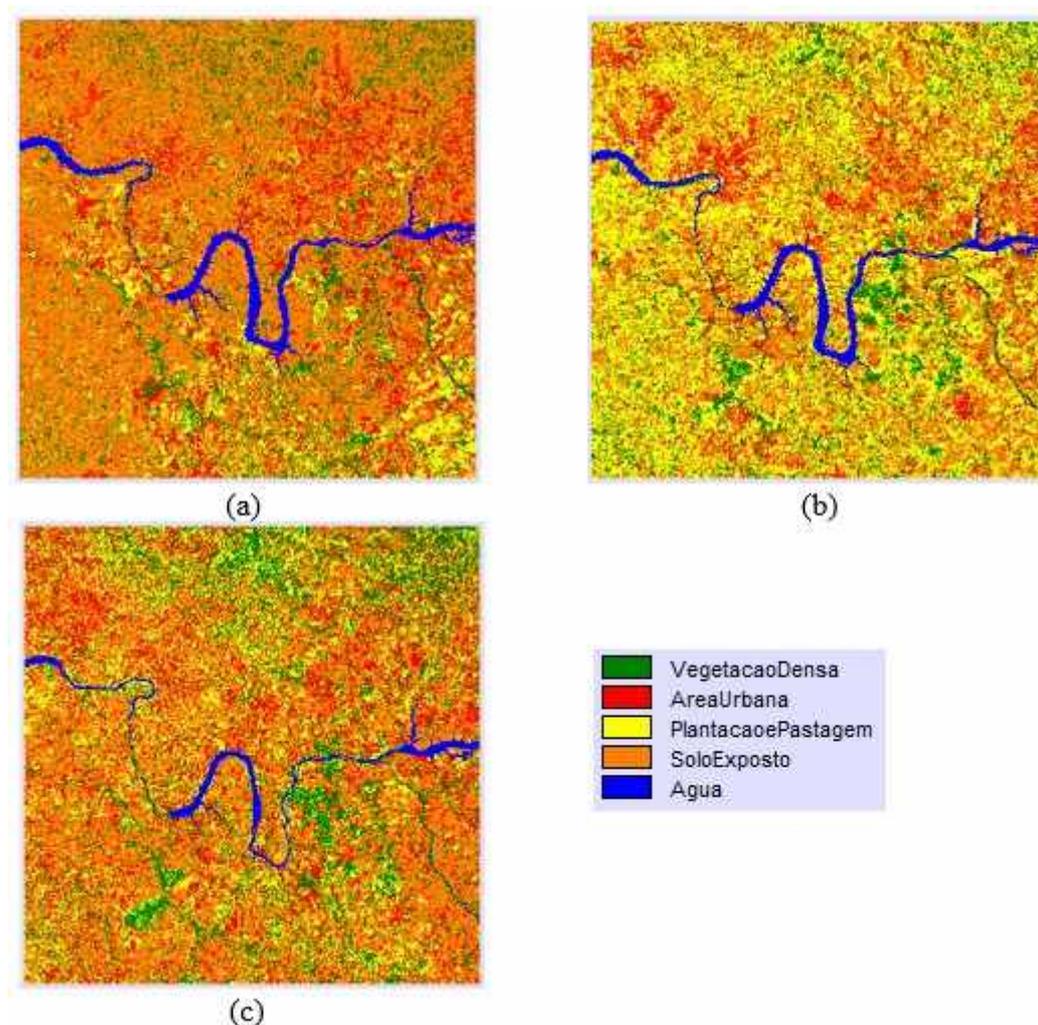


Fonte: O autor (2023).

É possível observar que as projeções previram um certo aumento das áreas de vegetação, o que, tendo em vista o que foi considerado na validação, provavelmente se trata de uma superestimativa. Entretanto, o cenário geral revelado é o seguinte: não existem tendências expressivas de alteração no uso e na ocupação do solo da área leste, pois é mantida a predominância das atividades agropecuárias, mostrada através de plantações, pastagens e solo exposto, enquanto que as áreas urbanas, embora passem por algum crescimento, não chegam a se refletir de modo preocupante em comparação com o todo da área.

As figuras 24, 25, 26 e 27, por sua vez, respeitam a mesma ordem das figuras de 15 a 18, porém com imagens da área oeste, sob a projeção EPSG: 32622, em coordenadas UTM.

FIGURA 24 - Mapas de uso e ocupação do solo para a área oeste em (a) 1995, (b) 2015 e (c) 2020



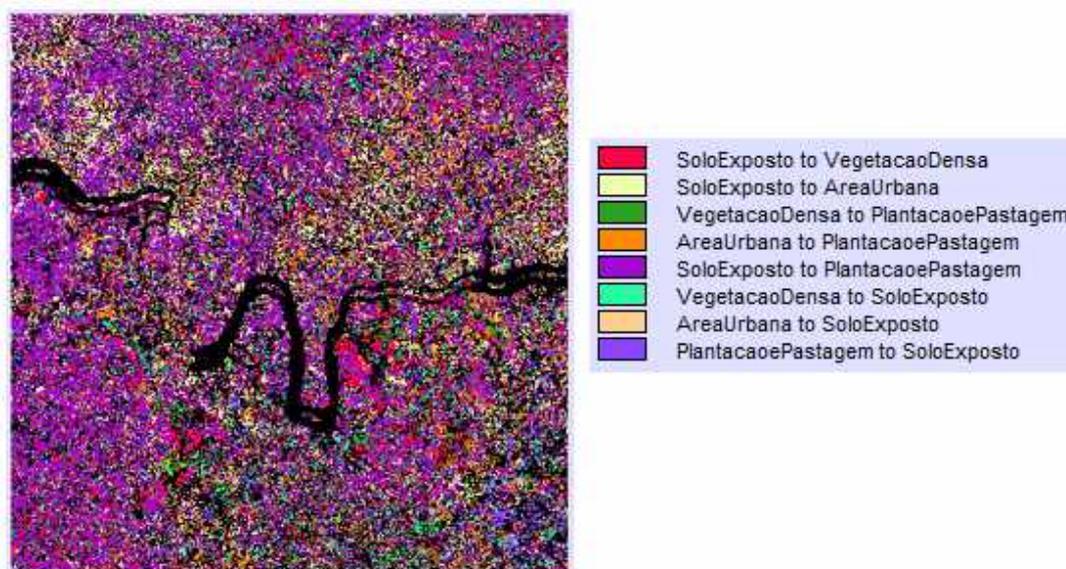
Fonte: O autor (2023).

Assim como na área leste, na área oeste também é mostrada a predominância de atividades rurais, com alternância entre áreas de solo exposto e com cultivo ou pastagem. O cenário de superestimativa de áreas urbanas se repete, provavelmente pelo mesmo motivo manifestado sobre a outra área. Novamente, 2020 retrata um cenário intermediário entre muitas áreas de solo exposto, como em 1995, e muitas áreas de cultivo, como em 2015.

As manchas de vegetação nativa são pequenas e espalhadas pela extensão da área, bem como as manchas urbanas são pequenas e sofrem poucas alterações, quando comparadas em termos

de área com toda a região analisada. Apesar de algumas falhas, pode-se considerar que os mapas elaborados conseguem representar bastante bem a realidade de uso e ocupação do solo na área oeste selecionada dentro da bacia do Rio Grande.

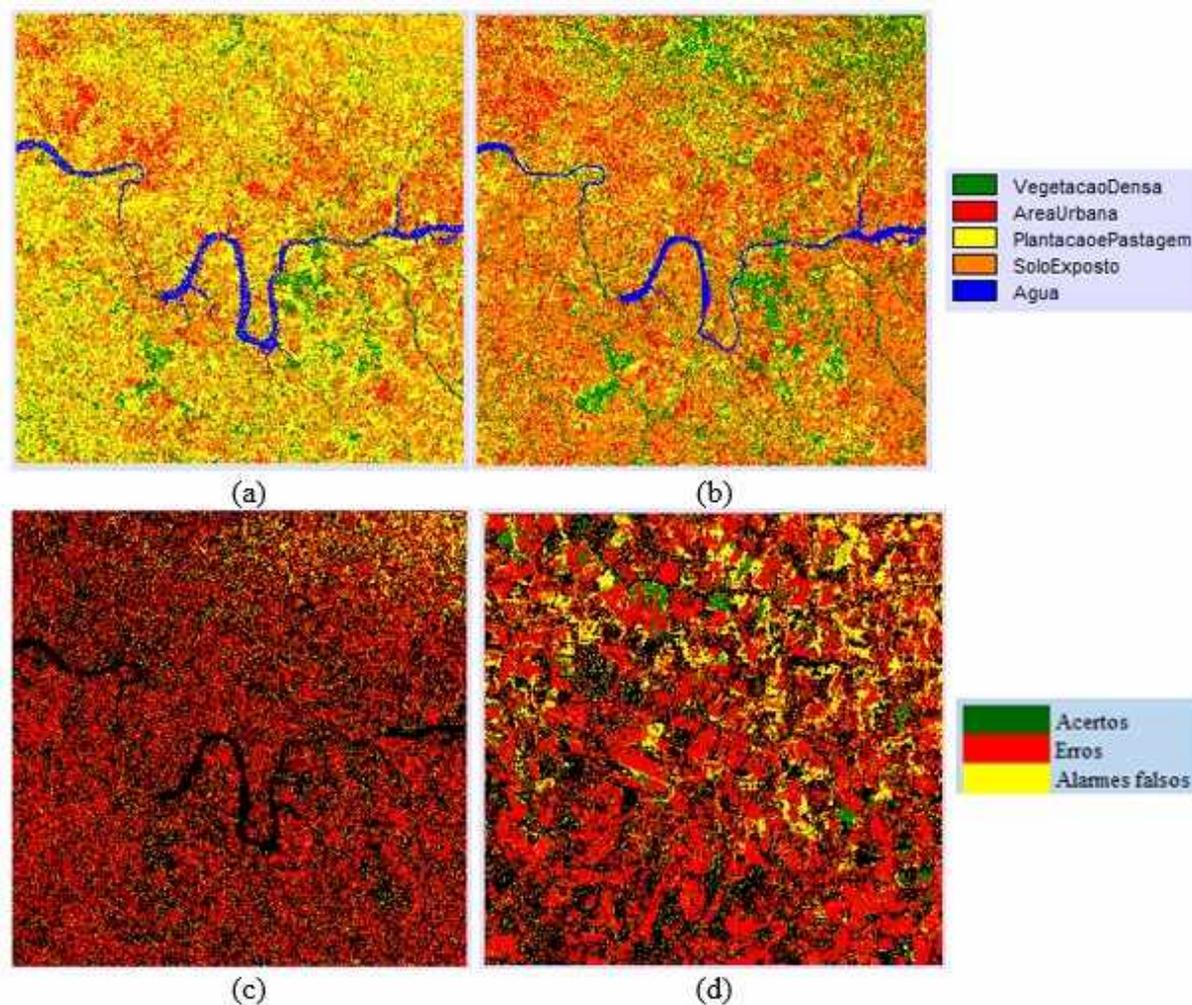
FIGURA 25 - Mapa de mudanças verificadas na área oeste entre 1995 e 2015



Fonte: O autor (2023).

Conforme esperado, a transição majoritária é a de solo exposto para plantação e pastagem. As transições improváveis de área urbana para plantação e pastagem e solo exposto possivelmente se devem à superestimativa das áreas urbanas já mencionada. A mudança considerada de solo exposto para vegetação densa, embora improvável, possui pouco destaque.

FIGURA 26 - Área oeste: (a) Projeção para o ano de 2020, (b) mapa real do ano de 2020, (c) mapa de validação e (d) detalhe do mapa de validação



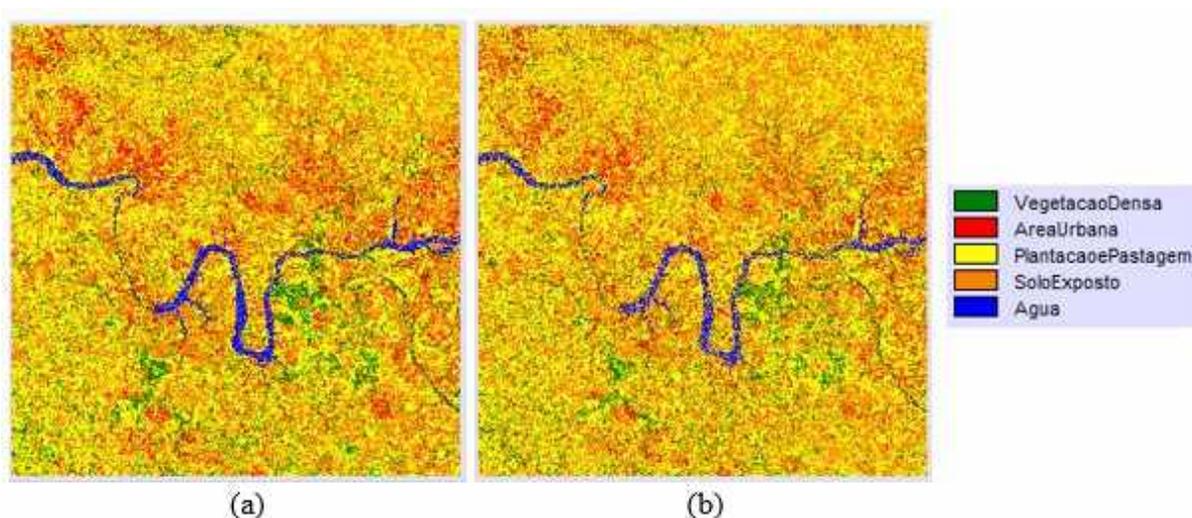
Fonte: O autor (2023).

Percebe-se uma condição muito similar à verificada na área leste: enquanto que a projeção, devido à transição de solo exposto para plantação e pastagem de 1995 a 2015, estabelece muitas áreas de cultivo, o mapa real revela uma grande predominância de solo exposto. Os erros encontrados pela validação muito provavelmente se devem em grande medida a tal fato, e as manchas representativas de acertos são pequenas e dispersas ao longo de toda a região.

A maior diferença em relação à situação observada na área leste é a de que, enquanto naquela ocorreu a superestimativa das áreas de vegetação, no presente caso houve a subestimativa das mesmas, especialmente no canto nordeste e ao longo da borda norte.

Existem acertos registrados para as transições: solo exposto para área urbana, vegetação nativa para plantação e pastagem, solo exposto para plantação e pastagem, vegetação nativa para solo exposto e plantação e pastagem para solo exposto. Também houve acertos registrados em passagens de solo exposto para vegetação nativa, área urbana para plantação e pastagem e área urbana para solo exposto. Isso provavelmente se deve à superestimativa das áreas urbanas e aos erros de consideração das áreas de vegetação nativa.

FIGURA 27 - Área oeste: (a) Projeção para os anos de 2025 e (b) 2035



Fonte: O autor (2023).

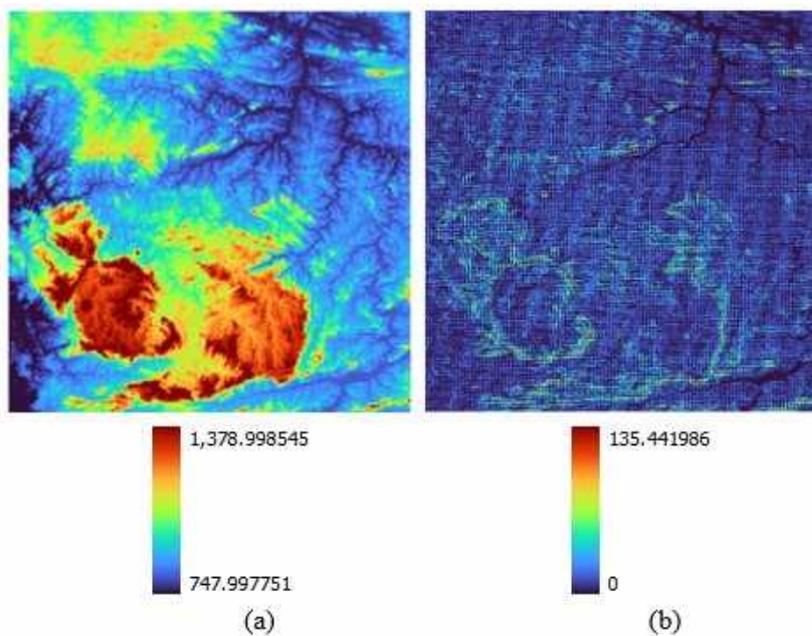
As projeções feitas para 2025 e 2035 preveem a manutenção da predominância da atividade agropecuária na área oeste, tal qual foi observado na área leste selecionada. As manchas urbanas, embora superestimadas, tendem a permanecer relativamente estáveis, e considerando a subestimativa das áreas de vegetação nativa verificada na validação, pode-se concluir que o decaimento previsto para essas áreas é maior do que o que realmente deve ocorrer.

5.9 MAPAS DE ELEVAÇÃO E DE DECLIVIDADE

As Figuras 28 e 29 apresentam os mapas de elevação e de declividade respectivamente para as áreas leste e oeste destacadas da bacia do Rio Grande. Todas as imagens mostradas foram montadas no QGIS sob a simbologia de banda simples falsa-cor, com interpolação linear, gradiente de cores turbo, considerando a variação de azul (menores valores) a vermelho (maiores valores) na escala cromática de intervalos iguais com 10 classes. Enquanto as imagens da área leste se encontram na projeção EPSG: 32623, com coordenadas geográficas,

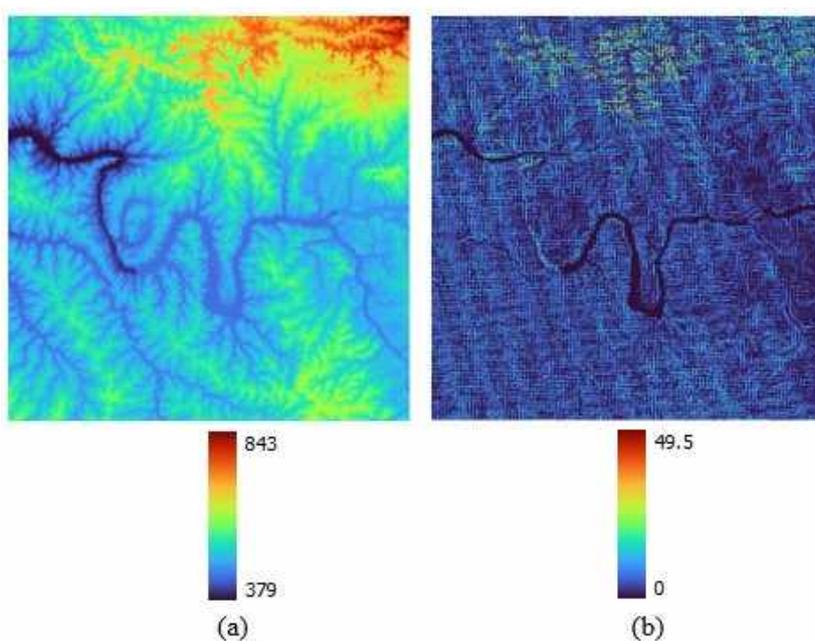
as imagens da área oeste ficam na projeção EPSG: 32622, também com coordenadas geográficas. Em ambas as figuras, as altitudes são mostradas em metros e as declividades em porcentagem, respeitando a ordem crescente de acordo com as escalas cromáticas presentes nas legendas.

FIGURA 28 - Área leste: (a) Mapa de elevação e (b) mapa de declividade



Fonte: O autor (2023).

FIGURA 29 - Área oeste: (a) mapa de elevação e (b) mapa de declividade



Fonte: O autor (2023).

Na área leste, verificam-se altitudes notavelmente elevadas especialmente no setor sul, havendo ainda uma concentração de altitudes menos elevadas, mas ainda notórias, no setor noroeste da área. É justamente nos contornos das áreas de maior altitude que tende a se situar a maior parte das maiores declividades, o que é logicamente esperado. É perceptível também uma tendência de que existam maiores áreas de vegetação nativa localizadas nas zonas de altas declividades. Isso é imaginável, uma vez que as vegetações nativas predominam nas maiores declividades, enquanto que a agricultura e a pecuária predominam nas declividades mais baixas (MARCHESAN, 2016).

De modo bastante similar, o mesmo se dá na área oeste, com a diferença de que as maiores altitudes e declividades se situam nas zonas norte e nordeste da área, onde também se dá a maior incidência de vegetação nativa. Deve ser destacado que ambas as áreas, leste e oeste, possuem em sua maior parte declividades baixas, o que de fato favorece as atividades de agricultura e pecuária (MARCHESAN, 2016), conforme constatado nas análises feitas no QGIS e no TerrSet.

6 CONCLUSÃO

Quanto às contribuições técnicas para a modelagem hidrológica, percebe-se que o trabalho executado com o MGB em conjunto com o equacionamento arraigado nos campos da estatística e do cálculo diferencial e integral produziu métricas de eficiência capazes de complementar de maneira satisfatória as métricas já existentes, proporcionando análises mais específicas e direcionadas das simulações geradas pelo modelo.

Enquanto os dados fornecidos pelas métricas tradicionais explicitavam a baixa qualidade da simulação não calibrada para o período de 01/01/1990 a 29/06/2015, expondo resultados gerais, as métricas desenvolvidas apontaram os erros cometidos pelo modelo em cada um dos 4 postos fluviométricos através de elementos específicos. Esses elementos são a posição dos erros relativo e absoluto do cálculo da vazão Q_{90} em relação aos demais erros do conjunto, a quantificação e a intensidade de subestimativa, acerto e superestimativa nas simulações e a compatibilidade entre os hidrogramas em relação ao seu comprimento e ao seu traçado.

Além disso, a composição elaborada com as métricas desenvolvidas, ao ser aplicada ao modelo HBV como função objetivo de calibração, teve seu efeito constatado como distinto do verificado nas métricas tradicionalmente utilizadas (NASH, NASHLOG e PBIAS). Verdadeiramente, observou-se que a composição promoveu uma certa suavização dos dados de vazão, o que foi confirmado pela análise comparativa dos valores de R^2 calculados para as retas de tendência geradas nos hidrogramas de vazões observadas, vazões sem calibração, vazões sob a calibração com NASH, vazões sob a calibração com NASHLOG e vazão sob a calibração com PBIAS. De modo notório, o valor de R^2 foi maior para o caso em que se usou a composição.

A respeito das contribuições à gestão de recursos hídricos na bacia do Rio Grande, o cruzamento dos dados gerados pelas médias móveis com análise de probabilidade, pelos testes estatísticos e pela análise de uso e ocupação do solo revela uma série de condições observadas na bacia ao longo do período de 01/01/1990 a 29/06/2015.

Primeiramente, as estimativas de vazões feitas através da média móvel com suavização exponencial simples mostraram ser confiáveis perante um alto percentual de séries temporais de vazão separadas por datas mensais. A análise probabilística desses dados por meio de cadeias de Markov demonstra que, diante das variações de vazão observadas ao longo de cada série temporal, grande parte das estimativas feitas via MME se mostram com chances altas de terem se efetivado. Contudo, a validade dessas previsões ficou limitada à aprovação matemática, haja vista que se mostrou pouco eficiente na aproximação entre o hidrograma simulado e o hidrograma de vazões medidas.

O teste de Mann-Kendall demonstrou que a maior parte das séries temporais de vazão separadas por datas mensais não possui nenhuma tendência significativa. O teste de Pettit provou que na maioria das mesmas séries não há nenhum ponto de ruptura em seu comportamento. Ademais, o teste t de *student* apontou que na maioria das séries também não existem diferenças de grande significância entre as médias de vazões do período mais antigo e do período mais recente. Em complemento, a análise das 3 últimas vazões de cada série dentro dos intervalos estatísticos delimitados pelos quartis, pela média e pelo desvio padrão também não conclui a existência de tendências evidentes no comportamento do regime de vazões da bacia no período de 01/01/1990 a 29/06/2015.

Quanto ao comportamento do uso e da ocupação do solo na bacia do Rio Grande, as amostras consideradas na análise elaborada no QGIS para os mapas dos anos de 1995, 2005 e 2015 mostram certa estabilidade das formas de uso do solo. Basicamente, a atividade agropecuária segue dominante nas 3 áreas mapeadas, representada por plantações, pastagens e solos expostos (entre a colheita e o plantio), enquanto que há áreas pequenas e dispersas de vegetação nativa densa, e também manchas urbanas que, embora se expandam, não possuem áreas tão consideráveis diante do todo avaliado.

Em seguida, a análise no TerrSet de transições entre os estados de uso e ocupação de solo em 2 regiões, que contêm as áreas mapeadas no QGIS, nos anos de 1995 e 2015, igualmente aponta para a grande prevalência da atividade agropecuária, também representada por plantações, pastagens e solo exposto. Além disso, as previsões feitas para ambas as regiões para os anos de 2025 e 2035, mostram a tendência de que não haja grandes alterações na cobertura do solo na bacia do Rio Grande, pelo menos até o ano de 2035. A expansão das áreas urbanas não deve ser tão expressiva em relação às áreas analisadas, as áreas preservadas de vegetação nativa e densa tendem a ser mantidas, e atividade agropecuária deve continuar muito prevalente.

Em acréscimo, a comparação entre os dados do TerrSet e os mapas de elevação e declividade percentual produzidos no QGIS mostram que as regiões com maiores declividades, especialmente as situadas nos arredores de áreas com as maiores altitudes, tendem a ser aquelas com mais vegetação preservada tanto nos mapas de análise temporal, quanto nos mapas de previsão. Ao mesmo tempo, nas áreas de baixas declividades predominam as atividades agropecuárias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Catálogo de metadados da ANA**: base hidrográfica ottocodificada da bacia do Rio grande. [s.l.]: ANA, 2014. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/b13fa102-148d-4c4a-b7cd-02f23027e5c1>. Acesso em: 20 out. 2022.
- _____. **HIDROWEB v3.2.7**. [s.l.]: ANA, 2022. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa>. Acesso em: 14 fev. 2023.
- AHMEDI, Arman; NASSERI, Mohsen; SOLOMATINE, Dimitri P. Parametric uncertainty assessment of hydrological models: coupling UNEEC-P and a fuzzy general regression neural network, **Hydrological Sciences Journal**, Londres, v. 64, n. 9, p. 1080-1094, 2019. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1610565>
- ALEXANDER, D. L. J.; TROPSHA, A.; WINKLER, David A. Beware of R²: simple, unambiguous assessment of the prediction accuracy of QSAR e QSPR models, **Journal of Chemical Information and Modeling**, Washington, v. 55, n. 7, p. 1316-1322, jun. 2015. <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.5b00206>
- ALLABY, Michael. **Dictionary of Earth Sciences**. 3 ed. Oxford: Oxford Press, 2008.
- ALMEIDA, Liziane; SERRA, Juan Carlos Valdés. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas, **Revista da FAE**, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 129-137, jan./jun. 2017.
- ALVARENGA, Silvia Maria; SILVA, José Eduardo Bezerra da; NUNES, Péricles Siqueira. Unidades de relevo. *In*: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **Recursos naturais e meio ambiente**: uma visão do Brasil. 2 ed. Rio de Janeiro: Divisão de Editoração/Departamento de Editoração e Gráfica - DEDIT/CDDI, 1997. p.51-73.
- ALVES, Bruno Costa Castro; SOUZA FILHO, Francisco de Assis de; SILVEIRA, Cleiton da Silva. Análise de tendências e padrões de variação das séries históricas de vazões do Operador Nacional do Sistema (ONS), **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 18, n. 4, p. 19-34, out./dez. 2013. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v18n4.p19-34>
- BARTLETT, Maurice Stevenson. **An introduction to stochastic processes**: with special reference to methods and applications. 3 ed. Cambridge: Cambridge University, 1978.
- BARTLETT, Peter L. Benign overfitting in linear regression, **PNAS**, Washington, v. 117, n. 48, p. 30063-30070, dez. 2020. <https://doi.org/10.1073/pnas.1907378117>
- BAYER, Débora Missio; COLLISCHONN, Walter. Análise de sensibilidade do modelo MGB-IPH a mudanças de uso da terra, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 165-179, jul./set. 2013. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v18n3.p165-179>
- BECKER, João Luiz. **Estatística básica**: transformando dados em informação [recurso eletrônico]. Porto Alegre: Bookman, 2015. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Estat%C3%ADstica_B%C3%A1sica/ZydqBgAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=estatistica&printsec=frontcover. Acesso em: 19 fev. 2023.

BENETTI, Antônio D.; LANNA, A. Eduardo; COBALCHINI, Maria Salete. Metodologias para determinação de vazões ecológicas em rios, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 149-160, abr./jun. 2003. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v8n2.p149-160>

BERNARDO, Luiz Di; BOTARI, Alexandre; SABOGAL-PAZ, Lyda Patricia. Uso de modelação matemática para projeto de câmaras mecanizadas de floculação em série em estações de tratamento de água, **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 1, p. 82-90, jan./mar. 2005. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522005000100010>

BERNIS, Josep Maria Franqueti. **Cinco temas de hidrología e hidráulica**. Las Condes: Bibliográfica Internacional, 2003.

BILLO, E. Joseph. **Excel for scientists and engineers: numerical methods**. Hoboken: John Wiley and Sons, 2007. <https://doi.org/10.1002/9780470126714>

BLACK, Thomas L. The new NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples, **Weather and Forecasting**, [s.l.], v. 9, p. 265-278, jun. 1994. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1994\)009<0265:TNNMEM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1994)009<0265:TNNMEM>2.0.CO;2)

BORGES, Murilo Pereira. **Análise da alteração do escoamento superficial pela tendência de evolução do uso e ocupação do solo usando cadeia de Markov e análise espacial para bacia do córrego de São Pedro, Uberlândia/MG**. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, Uberlândia, 2020.

BRITO NETO, Rodrigo Lacerda *et al.* Aplicação do modelo MGB-IPH na bacia hidrográfica do Rio Pardo em diferentes cenários de uso e ocupação do solo, **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 191-213, jan./mar. 2021. <https://doi.org/10.5902/1980509836095>

BUENO, Guilherme Cavallari. **Métodos de cálculo para análises na engenharia civil: roteiro de cálculo com abrangência interdisciplinar**. 2020. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

BUENO, Guilherme Cavallari; PEREIRA, Carlos Eugênio; MORAIS, Ismarley Lage Horta. Dedução de coeficiente estatístico para a avaliação da eficiência do processo de tratamento de esgotos por reatores de mistura completa. *In*: Simpósio de Pós Graduação e Pesquisa em Engenharia Civil., 2021, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2021.

BURHAN, Ahmad Khan *et al.* Prognosis of hydro-meteorological attributes based on simulation and projection of streamflow in a high-altitude basin using Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV) model, **Aquademia**, [s. l.], v. 4, n. 1, 2020. <https://doi.org/10.29333/aquademia/8226>

CALLEGARI-JACQUES, Sidia M. **Bioestatística**. Porto Alegre: Artmed, 2007. *E-book*. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=nuaVLSCiAgsC&oi=fnd&pg=PA8&dq=t+de+student+variâncias+supostamente+iguais&ots=FueZLr_RcS&sig=IoChqbn34rCE4XkdLbdMuyZ50o#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 10 ago. 2023.

CARVALHO, Wallison Moreira de; COSTA, Denis Duda; FRAGOSO JUNIOR, Carlos Ruberto. Avaliação de diferentes fontes de dados de precipitação e seus impactos na simulação dos processos hidrológicos. *In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 23., 2019, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABRH, 2019.

CASTRO, Ricardo M. C. *et al.* Estrutura e composição da ictiofauna de riachos da Bacia do Rio Grande no estado de São Paulo, sudeste do Brasil, **Biota Neotrópica**, Campinas, v. 4, n. 1, abr. 2004. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032004000100006>

CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?, **Geoscientific Model Development**, Gottingen, v. 7, p. 1525-1534, 2014. <https://doi.org/10.5194/gmdd-7-1525-2014>

CHAPRA, Steven C.; CANALE, Raymond P. **Métodos numéricos para engenharia**. Tradução: Helena Maria Avila de Castro. 7 ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. Título original: Numerical methods for engineers.

CLAESSON, Jakob; MOLAVI, Sam. **Intelligent hydropower: making hydropower more efficient by utilizing machine learning for inflow forecasting**. 59 f. Dissertação (Mestrado em Economia Industrial) – KTH Vetenskap och Konst, KTH Industrial Engineering and Management, Estocolmo, 2020.

CLARKE, Robin T. A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use, **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 19, n. 1, p. 1-20, maio 1973. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(73\)90089-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(73)90089-9)

CLARK, Martyn *et al.* The abuse of popular performance metrics in hydrologic modeling, **Water Resources Research**, Hoboken, v. 57, n. 9, set. 2021. <https://doi.org/10.1029/2020WR029001>

COELHO, Victor H. R. *et al.* Dinâmica do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica do semiárido brasileiro, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 1, p. 64-72, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000100009>

COLLISCHONN, Walter *et al.* The MGB-IPH model for large-scale rainfall–runoff modelling. **Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques**, Londres, v. 52, n. 5, p. 878-895, out. 2007. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>

COLLISCHONN, Walter; FAN, Fernando Mainardi. Porto Alegre: [s.n.], 2020. 1 vídeo (33 min). Curso MGB – teoria otimização e calibração. **Publicado pelo canal Hidrologia Grande Escala**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=M0Do4MCCjiU&list=PLFdJcfevjscprnSNZ52nn6wMLBQN9o8vG&index=7>. Acesso em: 02 nov. 2022.

COLLISCHONN, Walter. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 277 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2001.

COSTA, Ismael Victor de Lucena. **Processos estocásticos: difusão e crescimento**. 124 f. Tese (Doutorado em Física) – Universidade de Brasília, Instituto de Física, Brasília, 2006.

CRUZ, Marcus Aurélio Soares *et al.* Applicability of TRMM precipitation for hydrologic modeling in a basin in the Northeast Brazilian Agreste, **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 33, n. 1, p. 57-64, 2018. <https://doi.org/10.1590/0102-7786331013>

CYRÍACO, Fernanda Ramos. **Relação entre os aspectos fisiográficos e pedológicos e a instalação do bioma cerrado no contexto da evolução da paisagem em Franca, SP.** 94 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2012.

DINIZ, Célio Campolina. Desenvolvimento poligonal no Brasil: nem desconcentração, nem contínua polarização, **Nova Economia**, Belo Horizonte, v. 31, n. 1, p. 35-64, set. 1993.

EASTMAN, J. Ronald. **TerrSet 2020: geospatial monitoring and modeling system.** Worcester: Clark University, 2020. 389 p. Disponível em: <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2020/05/Terrset-Manual.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2023.

EDUARDO, Eliete Nazaré *et al.* Hydrological simulation as subside for management of surface water resources at the Mortes River Basin, **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 4, p. 390-404, jul./ago. 2016. <https://doi.org/10.1590/1413-70542016404009516>

ELSNER, Marketa M. *et al.* How does the choice of distributed meteorological data affect hydrologic model calibration and streamflow simulations?, **Journal of Hydrometeorology**, Boston, v. 15, n. 4, p. 1384-1403, ago. 2014. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-083.1>

ELSNER, Marketa M. *et al.* Implications of 21st century climate change for the hydrology of Washington State, **Climatic Change**, Berlim, v. 102, p. 225-260, maio 2010. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9855-0>

FAJARDO, Sergio; KEISLER, H. Jerome. **Model theory of stochastic processes.** 2 ed. Cambridge: Cambridge University/Association for Symbolic Logic, 2016.

FAN, Fernando Mainardi; COLLISCHONN, Walter. Integração do modelo MGB-IPH com sistema de informação geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 243-254, jan./mar. 2014. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p243-254>

FAN, Fernando Mainardi; MEYER, Aline; GAMA, Cléber. Porto Alegre: [s.n.], 2020. 1 vídeo (22 min). Introdução ao MGB – Modelo de Grandes Bacias. **Publicado pelo canal Hidrologia Grande Escala.** Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=y6Zic8n8F5M&list=PLFdJcfevjscprnSNZ52nn6wMLBQN9o8vG&index=1>. Acesso em: 20 out. 2022.

FAN, Fernando Mainardi. Porto Alegre: [s.n.], 2020. 1 vídeo (32 min). Curso MGB – aplicação calibração automática. **Publicado pelo canal Hidrologia Grande Escala.** Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=aoTr2LtNJ_w&list=PLFdJcfevjscprnSNZ52nn6wMLBQN9o8vG&index=8. Acesso em: 02 nov. 2022.

FEIJOO, Ana Maria Lopez Calvo de. **A pesquisa e a estatística na psicologia e na educação.** Rio de Janeiro: Centro Edelstein de Pesquisas Sociais, 2010. *E-book*. Disponível em:

[file:///C:/Users/User/Documents/Mestrado/Qualifica%C3%A7%C3%A3o/Material%20consultado%20\(adicional\)/ABNT%20NBR%206023%202018%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/User/Documents/Mestrado/Qualifica%C3%A7%C3%A3o/Material%20consultado%20(adicional)/ABNT%20NBR%206023%202018%20(1).pdf). Acesso em: 03 ago. 2023.

FELIX, Vagner de Souza. **Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido**. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, João Pessoa, 2015.

FERNANDES, Luiz Alberto; COIMBRA, Armando Márcio. Revisão estratigráfica da parte oriental da bacia Bauru (neocretáceo), **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 717-728, dez. 2000. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2000304717728>

FERNANDES, Camila Junqueira. **Análise quali-quantitativa dos elementos arquitetônicos e vegetais e de uso da Praça Rui Barbosa de São José do Rio Preto, SP**. 65 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal)) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2016.

FERREIRA, Manuel Eduardo. Desmatamentos no bioma Cerrado: uma análise temporal (2001-2005) com base nos dados MODIS - MOD13Q1. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 3877-3883.

FERREIRA, Paloma Mara de Lima. **Influência da seleção das funções objetivo na calibração do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH**. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

FONTES, Vitor Cunha. **Efeitos da expansão agrícola na disponibilidade hídrica do oeste da Bahia via modelagem hidrológica**. 81 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, Viçosa, 2022.

GAMA, Cléber; FAN, Fernando Mainardi. Porto Alegre: [s.n.], 2020. 1 vídeo (33 min). Parâmetros de solo do modelo MGB – representação física e calibração manual. **Publicado pelo canal Hidrologia Grande Escala**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=oda1oyI72j8&list=PLFdJcfevjscprnSNZ52nn6wMLBQN9o8vG&index=4>. Acesso em: 02 nov. 2022.

GENEROSO, Tarcila Neves. **Modelagem hidrológica visando a melhoria da qualidade de dados diários de vazão em estações fluviométricas convencionais localizadas a jusante de reservatórios de regularização**. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, Viçosa, 2021.

GOOGLE EARTH ENGINE. Explorer. [s.l.], 2022. Disponível em: <https://explorer.earthengine.google.com/#workspace>. Acesso em: 26 out. 2022.

GROPPO, Juliano Daniel. **Estudo de tendências nas séries temporais de qualidade de água de rios do estado de São Paulo com diferentes graus de intervenção antrópica**. 72 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) – Programa de Pós-Graduação em Ecologia de Agroecossistemas, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

GUILHON, Luiz Guilherme Ferreira; ROCHA, Vinicius Forain; MOREIRA, Jonatas Costa. Comparação de métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidroelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 13-20, jul./set. 2007. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v12n3.p13-20>

GUPTA, Hoshin Vijai *et al.* Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling, **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 377, n. 1-2, p. 80-91, out. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>

GUPTA, Hoshin Vijai; SOROOSHIAN, Soroosh.; YAPO, Patrice Ogo. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration, **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))

HIDROLOGIA DE GRANDE ESCALA - HGE. **Mapa de URHs da América do Sul**. Porto Alegre: HGE, 2015. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos/sensoriamento-remoto/mapa-de-urhs-da-america-do-sul/>. Acesso em: 26 out. 2022.

HIDROLOGIA GRANDE ESCALA. Porto Alegre: [s.n.], 2021. 1 vídeo (81 min). Curso MGB – aplicações do MGB (2001-2021). **Publicado pelo canal Hidrologia Grande Escala**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Zy2qwyPdKdw&list=PLFdJcfevjscprnSNZ52nn6wMLBQN9o8vG&index=9>. Acesso em: 02 nov. 2022.

_____. Porto Alegre: [s.n.], 2020b. 1 vídeo (48 min). Introduzindo o código-fonte do MGB. **Publicado pelo canal Hidrologia Grande Escala**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=LcDXuFr8jqs&list=PLFdJcfevjscprnSNZ52nn6wMLBQN9o8vG&index=6>. Acesso em: 02 nov. 2022.

_____. Porto Alegre: [s.n.], 2020a. 1 vídeo (57 min). Noções básicas de Fortran + modelo hidrológico concentrado. **Publicado pelo canal Hidrologia Grande Escala**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=M5Dao0m2kbQ&list=PLFdJcfevjscprnSNZ52nn6wMLBQN9o8vG&index=5>. Acesso em: 02 nov. 2022.

HIPEL, Keith W.; McLEOD, A. Ian. **Time series modelling of water resources and environmental systems**. 1 ed. Amsterdam: Elsevier, 1994.

HOU, Kun *et al.* Automatic extraction of drainage networks from DEMs base on heuristic search, **Journal of Software**, [s.l.], v. 6, n. 8, p. 1611-1618, ago. 2011. <https://doi.org/10.4304/jsw.6.8.1611-1618>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37238-pais-tem-90-milhoes-de-domicilios-34-a-mais-que-em-2010#:~:text=No%20pa%C3%ADs%2C%20a%20m%C3%A9dia%20de,23%2C9%20habitan%20por%20km%C2%B2>. Acesso em: 01 set. 2023.

_____. **Densidade Demográfica**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/sociedade-e-economia/15955-densidade-demografica.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 10 fev. 2023.

_____. **Mapa da área de aplicação da lei nº 11.428 de 2006**: decreto nº 6.660, de 21 de novembro de 2008, publicado no Diário Oficial da União de 24 de novembro de 2008. Rio de Janeiro: IBGE, 2008. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?id=69583&view=detalhes>. Acesso em: 18 jul. 2022.

_____. **Monitoramento da cobertura e uso da terra do Brasil: 2016-2018** (folder). [s.l.]: IBGE, 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/cobertura-e-uso-da-terra/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html?edicao=27217&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 04 jun. 2022.

_____. **Pedologia**. [s.l.]: IBGE, (2006b). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia.html>. Acesso em: 15 abr. 2022.

_____. **Unidades de relevo 1:50000000**: 2006. [s.l.]: IBGE, 2006a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geomorfologia/15827-unidades-de-relevo.html?=&t=downloads>. Acesso em: 14 abr. 2022.

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS – IPH. **Curso de capacitação tecnológica para aplicações e desenvolvimento**: guia prático de código-fonte: rotinas do MGB. Porto Alegre: [IPH], 2020d. 49 p. v. 4. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/downloads/mgb-4-6-2/>. Acesso em: 02 nov. 2022.

_____. **Curso de capacitação tecnológica para aplicações e desenvolvimento**: manual de aplicação do modelo MGB utilizando IPH-*Hydro Tools*. Porto Alegre: [IPH], 2020b. 54 p. v. 1. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/downloads/mgb-4-6-2/>. Acesso em: 02 nov. 2022.

_____. **Curso de capacitação tecnológica para aplicações e desenvolvimento**: manual de referência teórica do MGB. Porto Alegre: [IPH], 2020a. 45 p. v. 2. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/downloads/mgb-4-6-2/>. Acesso em: 02 nov. 2022.

_____. **Curso de capacitação tecnológica para aplicações e desenvolvimento**: noções de Fortran e programação de modelo hidrológico concentrado. Porto Alegre: [IPH], 2020c. 32 p. v. 3. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/downloads/mgb-4-6-2/>. Acesso em: 02 nov. 2022.

_____. **Manual expresso de calibração dos parâmetros do MGB-IPH**. Porto Alegre: IPH, 2017. 19 transparências, color. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/downloads/mgb-4-6-2/>. Acesso em: 02 nov. 2022.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Diagnóstico da situação dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG) – SP/MG (Relatório Síntese – R3)**: relatório síntese R3. São Paulo: IPT, 2008. (Relatório Técnico nº 96.581-205).

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA - INEGI. **Biblioteca digital de mapas**. [s.l.]: INEGI, 2022. Disponível em: <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>. Acesso em: 26 out. 2022.

JACOBS, F. Robert; CHASE, Richard B. **Administração de operações e da cadeia de suprimentos**. Tradução: Monica R. Rosemberg e Joyce I. Prado. 13 ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. Título original: Operations and supply chain management.

JARDIM, Pedro Frediani *et al.* **Manual de exemplo de aplicação do pacote de ferramentas IPH-Hydro Tools**. Porto Alegre: [INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS – IPH], 2014. [23] p. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/downloads/mgb-4-6-2/>. Acesso em: 01 nov. 2022.

KAYSER, Rafael Henrique B.; COLLISCHONN, Walter. Integrando sistema de suporte à decisão genérico para gerenciamento de recursos hídricos a um SIG de código aberto. *In*: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: ABRH, 2013.

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. 4 ed. Londres: Charles Griffin, 1975.

KOCH, Julian; DEMIREL, Mehmet Cüneyd; STISEN, Simon. The spatial efficiency metric (SPAEF): multiple-component evaluation of spatial patterns for optimization of hydrological models, **Geoscientific Model Development**, Gottingen, v. 11, p. 1873-1886, 2018. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1873-2018>

LAMONTAGNE, Jonathan R.; BARBER, Caitline A.; VOGEL, Richard M. Improved estimators of model performance efficiency for skewed hydrologic data, **Water Resources Research**, Hoboken, v. 56, n. 9, set. 2020. <https://doi.org/10.1029/2020WR027101>

LAURENTIS, Guilherme Lucas de. **Modelo de transferência de riscos hidrológicos como estratégia de adaptação às mudanças globais segundo cenários de vulnerabilidade dos recursos hídricos**. 214 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

LIEW, Michael W. Van; ARNOLD, Jeffrey G.; GARBRECHT, J.D. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: choosing between two models, **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 46, n. 6, p. 1539-1551, 2003. <https://doi.org/10.13031/2013.15643>

LIEW, Michael W. Van *et al.* Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: a comparison on USDA agricultural research service watersheds, **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 12, n. 2, 173-189, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:2\(173\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:2(173))

LÚCIO, Paulo Sérgio *et al.* Um modelo estocástico combinado de previsão sazonal para a precipitação no Brasil, **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, p. 70-87, mar. 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000100007>

MANN, H. B. Non-parametric test against trend, **Econometrica**, [s.l.], v. 13, p. 245-259, 1945. <https://doi.org/10.2307/1907187>

MAPBIOMAS. **Mapas das coleções**. [s. l.]: MAPBIOMAS, 2023. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/downloads/>. Acesso em: 19 out. 2023.

MARCHESAN, Juliana *et al.* Análise da relação entre a evolução florestal e a declividade utilizando imagens *Landsat*, **Nativa**, Sinop, v. 4, n. 1, p. 53-57, jan./fev. 2016. <https://doi.org/10.14583/2318-7670.v04n01a11>

MATA, Henrique Tomé da Costa; SOUZA, Agostinho Lopes de. Estimativa do consumo residencial de lenha num distrito do estado de Minas Gerais, Brasil, **Revista Árvore**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 63-71, 2000.

MEDEIROS, Matheus Sampaio *et al.* **Manual de exemplo de aplicação do modelo MGB 2018 utilizando o IPH-Hydro Tools**. Porto Alegre: [INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS – IPH], 2019. [85] p. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/downloads/mgb-4-6-2/>. Acesso em: 01 nov. 2022.

MEDEIROS, Raimundo de *et al.* Tendências pluviiais e análise da média móvel para São Bento do Una-PE, Brasil, **Revista de Geografia**, Recife, v. 35, n. 5, p. 38-54, 2018. <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2018.229384>

MEDINA, Yelena; MUÑOZ, Enrique. Analysis of the relative importance of model parameters in watersheds with different hydrological regimes, **Water**, Basileia, v. 12, n. 9, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12092376>

MESINGER, Fedor *et al.* The step-mountain coordinate: model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. **Monthly Weather Review**, [s.l.], v. 116, p. 1493-1518, jul. 1988. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116<1493:TSMCMD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<1493:TSMCMD>2.0.CO;2)

MEYER, Aline; FAN, Fernando Mainardi. Porto Alegre: [s.n.], 2020a. 1 vídeo (25 min). Aplicação do IPH-*Hydro Tools* para uso do modelo MGB. **Publicado pelo canal Hidrologia Grande Escala**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=6eJykhwveyM&list=PLFdJcfevjscprnSNZ52nn6wMLBQ N9o8vG&index=3>. Acesso em: 20 out. 2022.

_____. Porto Alegre: [s.n.], 2020b. 1 vídeo (23 min). Rodando o modelo MGB. **Publicado pelo canal Hidrologia Grande Escala**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=KrS-eSE4MLQ&list=PLFdJcfevjscprnSNZ52nn6wMLBQN9o8vG&index=4>. Acesso em: 02 nov. 2022.

MIRANDA, Zenilton de Jesus Gayoso. Flora. *In*: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Bioma Cerrado**. Brasília: EMBRAPA, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-cerrado>. Acesso em: 09 jun. 2022.

MIZUKAMI, Naoki. On the choice of calibration metrics for “high-flow” estimation using hydrologic models, **Hydrology and Earth System Sciences**, Gottingen, v. 23, n. 6, p. 2601-2614, 2019. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2601-2019>

MOORE, R.T.; CLARKE, Robin T. A distribution function approach to rainfall-runoff modelling, **Water Resource Research**, [s.l.], v. 17, n. 5, p. 1367-1382, out. 1981. <https://doi.org/10.1029/WR017i005p01367>

MORTATTI, Jefferson *et al.* Hidrologia dos rios Tietê e Piracicaba: séries temporais de vazão e hidrogramas de cheia, **Revista de Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 12, n. 23, p. 55-67, jan./jun. 2004.

NAGHETTINI, Mauro; PINTO, Éber José de Andrade. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NASCIMENTO, Fellipe Alves O.; NEVES, Otaviano Francisco. Uma análise espacial de fatores que afetam a qualidade da água dos reservatórios em cascata na bacia do Rio Grande, **Revista do Instituto de Ciências Humanas**, Belo Horizonte, v. 9, n. 12, p. 56-65, 2014.

NASCIMENTO, Sander da Rocha; NERY, Jonas Teixeira. Variabilidade da precipitação pluvial e da temperatura do ar em Ribeirão Preto (SP). *In: Encontro de Geógrafos da América Latina*, 10., 2005, [s.l.]. **Anais...** [s.l.]: USP, 2005. p. 10031-10041.

NASCIMENTO, Sebastião Vieira do. **Desvendando os segredos do triângulo retângulo e descobrindo curiosidades até hoje não conhecidas**. 1 ed. Rio de Janeiro: Gramma, 2018.

NASCIMENTO, Thiago Victor Medeiros do. Modelagem hidrológica mensal chuva–vazão utilizando dados de precipitação TRMM e mapas auto-organizáveis para a bacia do alto Rio São Francisco. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil e Ambiental, João Pessoa, 2021.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: a discussion of principles, **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

NASSERI, Mohsen. Uncertainty assessment of monthly water balance models based on incremental modified fuzzy extension principle method, **Journal of Hydroinformatics**, Londres, v. 15, n. 4, p. 1340-1360, abr. 2013. <https://doi.org/10.2166/hydro.2013.159>

NEWMAN, A. J. Development of a large-sample watershed-scale hydrometeorological data set for the contiguous USA: data set characteristics and assessment of regional variability in hydrologic model performance, **Hydrology and Earth System Sciences**, Gottingen, v. 19, n. 1, p. 209-223, 2015. <https://doi.org/10.5194/hess-19-209-2015>

NILSSON, Patrik; UVO, Cintia B.; BERNDTSSON, Ronny. Monthly runoff simulation: comparing and combining conceptual and neural network models, **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 321, n. 1-4, p. 344-363, abr. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.08.007>

NOBRE, Bárbara Viana Bezerra. **Modelagem hidrológica aplicada à avaliação da sinergia hídrica no reservatório Castanhão**. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

NUNES, Juliana Faria; ROIG, Henrique Llacer. Análise e mapeamento do uso e ocupação do solo da bacia do Alto do Descoberto, DF/GO, por meio de classificação automática baseada em regras e lógica nebulosa, **Revista Árvore**, Viçosa, v. 39, n. 1, p. 25-36, 2015. <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000100003>

OLIVEIRA, Fernanda A. *et al.* Impacto do uso de vazões naturais em estudos hidrológicos, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 3, p. 191-197, jul./set. 2008. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v13n3.p191-197>

OLIVEIRA, Riene Filgueiras de *et al.* Hydrological calibration and validation of the MGB-IPH model for water resource management in the upper Teles Pires River basin in the Amazon-Cerrado ecotone in Brazil, **Acta Amazônica**, Manaus, v. 49, n. 1, p. 54-63, 2019. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201800812>

OLIVEIRA, Thamyres Cardoso Chaves; GONÇALVES, Flávio Aparecido. Tamanho ideal de séries históricas de vazões mínimas anuais e suas aplicações em estudos hidrológicos: estudo de caso nas regiões hidrográficas Paraná e São Francisco, **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 4, p. 805-816, jul./ago. 2022. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220210232>

ONYUTHA, Charles. A hydrological model skill score and revised R-squared, **Hydrology Research**, Curitiba, v. 53, n. 1, p. 51-64, nov. 2021. <https://doi.org/10.2166/nh.2021.071>

PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de *et al.* Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin, **Water Resources Research**, [s.l.], v. 49, p. 1226-1243, 2013. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20067>

PAZ, Adriano Rolim da *et al.* Discretização de modelos hidrológicos de grande escala: grade regular x mini-bacias. *In*: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19., 2011, Maceió. **Anais...** Maceió: ABRH, 2011.

PEINADO, Jurandir; GRAEML, Alexandre Reis. **Administração da produção**: operações industriais e de serviços. Curitiba: UnicenP, 2007.

PENEREIRO, Júlio César; ORLANDO, Diogo Vieira. Análises de tendências em séries temporais anuais de dados climáticos e hidrológicos na bacia do Rio Parnaíba entre os estados do Maranhão e Piauí/Brasil, **Revista Geográfica Acadêmica**, [s.l.], v. 7, n. 2, p. 5-21, 2013. <https://doi.org/10.18227/1678-7226rga.v7i2.2988>

PEREIRA, Margarita; KAYSER, Rafel Bloedow; COLLISCHONN, Walter. Integração do Modelo Hidrológico para Grandes Bacias MGB-IPH e Sistemas de Informação Geográfica para suporte à decisão de outorga de direito de uso da água, **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre, v. 9, n. 2, p. 21-33, jul./dez. 2012. <https://doi.org/10.21168/rega.v9n2.p21-33>

PETTIT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem, **Applied Statistics**, Oxford, v. 28, n. 2, p. 126-135, 1979. <https://doi.org/10.2307/2346729>

PETRI, Setembrino; FÚLFARO, Vicente José. **Geologia do Brasil**. [s.l.], [s.d.], 1983.

PINHEIRO, Adilson; GRACIANO, Regina Luiza Gouvêa; SEVERO, Dirceu Luís. Tendência das séries temporais de precipitação da região sul do Brasil, **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 3, p. 281-290, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000300005>

PONTES, Paulo R. M. *et al.* Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 888-904, out./dez. 2015. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n4.p888-904>

POSSA, Thais Magalhães. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada da bacia hidrográfica MirimSão Gonçalo com influência do vento**. 122 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Pelotas, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Pelotas, 2019.

QUEIROGA, Yuri Givago; NAGHETTINI, Mauro; NASCIMENTO, Nilo. Avaliação de um método de assimilação de erros nas previsões de vazões de curto prazo afluentes ao reservatório da UHE Camargos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 3, p. 63-74, jul./set. 2005. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n3.p63-74>

RAMOS, Edson Marcos Leal Soares. **Aperfeiçoamento e desenvolvimento de ferramentas do controle estatístico da qualidade: utilizando quartis para estimar o desvio padrão**. 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Florianópolis, 2003.

RAWLS, Walter J. *et al.* Infiltration and soil water movement. *In*: MAIDMENT, David R. (Ed.) **Handbook of Hydrology**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1993. p. 5.1-5.51.

RIBEIRO NETO, Alfredo *et al.* Simulação na bacia Amazônica com dados limitados: Rio Madeira, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 3, p. 47-58, jul./set. 2008. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v13n3.p47-58>

RIBEIRO, Rayssa Balieiro *et al.* Variabilidade espaço-temporal da condição da vegetação na agricultura irrigada por meio de imagens Sentinel-2, **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 11, n. 6, p. 1884-1893, 2017. <https://doi.org/10.7127/rbai.v11n600648>

RIMAL, Bhagawat *et al.* Land use/land cover dynamics and modeling of urban land expansion by the integration of cellular automata and Markov Chain, **International Journal of Geo-Information**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 1-21, abr. 2018. <https://doi.org/10.3390/ijgi7040154>

SÁ JUNIOR, Arionaldo de. **Aplicação da classificação de Köppen para o Zoneamento Climático do Estado de Minas Gerais**. 101 p., il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, Engenharia de Água e Solo) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, 2009.

SANSIGOLO, C. A.; NERY, J. T. Distribuição de extremos de temperatura mínima no estado do Paraná, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, [s.l.], v. 8, n. 2, p. 247-253, 2000.

SANTOS, Eduardo H. M. dos; GRIEBELER, Nori P.; OLIVEIRA, Luiz F. C. de. Relação entre uso do solo e comportamento hidrológico na bacia hidrográfica do Ribeirão João

Leite, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 8, p. 826-834, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000800006>

SANTOS, Luan Carlos de Andrade. **Modelagem hidrológica de três bacias hidrográficas do alto e médio Pajeú, estado de Pernambuco**. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

SANTOS, Vítor de Oliveira. **Identificação e análise de tendências das variáveis hidrológicas e mudanças no uso e ocupação das terras no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Uberaba, em Minas Gerais**. 129 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Uberlândia, Uberlândia, 2016. <https://doi.org/10.14393/RCG175814>

SARRAZIN, Fanny; PIANOSI, Francesca; WAGENER, Thorsten. Global sensitivity analysis of environmental models: convergence and validation, **Environmental Modelling & Software**, [s. l.], v. 79, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.005>

SCHOUPS, G.; GIESEN, N. C. van de; SAVENIJE, H. H. G. Model complexity control for hydrologic prediction, **Water Resources Research**, [s. l.], v. 44, 2008. <https://doi.org/10.1029/2008WR006836>

SILVA, Benedito Cláudio da *et al.* Previsão hidroclimática de vazão de curto prazo na bacia do Rio São Francisco, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 31-41, jul./set. 2007. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v12n3.p31-41>

SILVA FILHO, Laércio José; CAMPOS, Mauro Forlan Duarte. O uso da média móvel como indicador de tendência: do mercado financeiro ao acompanhamento dos casos de COVID-19, **Revista Negócios em Projeção**, Brasília, v. 12, n. 2, p. 73-81, 2021.

SIQUEIRA, Vinícius Alencar *et al.* IPH-*Hydro Tools*: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 274-287, jan./mar. 2016. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p274-287>

SOBREIRO, Filipe José Nogueira. Modelos de previsão de deterioração de pontes existentes: processos de Markov. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

SOUSA, Rodrigo Vitor Barbosa; ROCHA, Paulo Cesar. Identificação de períodos hidrológicos por meio de estatística descritiva e dos testes não paramétricos de Pettit e Mann-Kendall, **Geosaberes**, Fortaleza, v. 6, n. 2, p. 113-129, nov. 2015.

SOUZA, Jussara Freire; SILVA, Richarde Marques; SILVA, Alexandre Medeiros. Influência do uso e ocupação do solo na temperatura da superfície: o estudo de caso de João Pessoa – PB, **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 21-37, jan./mar. 2016. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000100058>

SPERLING, Marcos Von. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, 1996. 211 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 2).

STAUDT, Francielly Hedler; COELHO, António Sérgio; GONÇALVES, Miriam Buss. Determinação da capacidade real necessária de um processo produtivo utilizando cadeia de Markov. **Produção**, [s.l.], v. 21, n. 4, p. 634-644, out./dez. 2011.

<https://doi.org/10.1590/S0103-65132011005000058>

TANAKA, Allan H.; STÁBILE, Régis L. B. Um estudo introdutório aos processos estocásticos sem memória: cadeias de Markov. *In*: Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP, 11., 2020, Presidente Epitácio. **Anais...** Presidente Epitácio: [s.n.], 2020.

TODINI, E. The ARNO rainfall-runoff model. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 175, n. 1-4, p. 339-382, fev. 1996. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)80016-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)80016-3)

TSCHIEDEL, Arthur da Fontoura; PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de; FAN, Fernando Mainardi. Use of large-scale hydrological models to predict dam break-related impacts. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 25, e. 35, 2020.

<https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190128>

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Escoamento superficial. *In*: TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2001. p. 391-442.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. **Earth explorer**. [s. l.]: USGS, (2023). Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 04 ago. 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA - UFU. **PV118 – Modelo de qualidade da água em rio**: Aula 2 – Características hidrológicas de rios. Uberlândia: [UFU], 2021.

UNIVERSIDADE POLITÉCNICA DE VALÊNCIA - UPV. **Curso de Engenharia de Caminhos, Portos e Canais**: disciplina Otimização de Recursos Hídricos. Valência: [UPV], 2021.

UNIVERSITY OF ZURICH - UZH. **HBV-light Model**. Zurich: [UZH], 2023. Disponível em: <https://www.geo.uzh.ch/en/units/h2k/Services/HBV-Model.html>. Acesso em: 16 out. 2023.

VAEZA, Rafael Franco *et al.* Uso e ocupação do solo em bacia hidrográfica urbana a partir de imagens orbitais de alta resolução, **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 1, p. 23-29, jan./jun. 2010. <http://dx.doi.org/10.4322/loram.2011.003>

VANZELA, Luiz S.; HERNANDEZ, Fernando B. T.; FRANCO, Renato A. M. Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 55-64, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000100008>

VESTENA, Leandro Redin *et al.* Vazão ecológica e disponibilidade hídrica na bacia das Pedras, Guarapuava-PR, **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 7, n. 3, p. 212-227, 2012. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.840>

WILLMOTT, Cort J.; MTSUURA, Kenji; ROBESON, Scott M. Ambiguities inherent in sums-of-squares-based error statistics, **Atmospheric Environment**, [s. l.], v. 43, p. 749-752, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.005>

XIONG, Lihua *et al.* Indices for assessing the prediction bounds of hydrological models and application by generalised likelihood uncertainty estimation, **Hydrological Sciences Journal**, Londres, v. 54, n. 5, p. 852-871, out. 2009. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.5.852>

XU, Zongxue; TAKEUCHI, Kuniyoshi; ISHIDAIRA, Hiroshi. Monotonic trend and step changes in japanese precipitation, **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 279, n. 1-4, p. 144-150, ago. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00178-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00178-1)

XUE, Ying. An overview of overfitting and its solutions, **Journal of Physics: Conference Series**, [s. l.], v. 1168, 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1168/2/022022>

ZIESLER, R.; ARDIZZONE, G.D. **The inland waters of Latin America**. Copescal Technical Paper. No. 1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Roma, 1979. Disponível em: <https://www.fao.org/3/ad770b/ad770b00.htm>. Acesso em: 01 jun. 2022.

ANEXO A – Procedimento padrão de extração dos parâmetros do canal no pré-processamento

Primeiramente, assim como sinaliza a ferramenta do IPH-*Hydro Tools*, as equações 122 e 123 representam relações que envolvem a área de drenagem.

$$W = a * A^b \tag{122}$$

Sendo W a largura do canal, a o coeficiente da equação, A a área de drenagem, e b o expoente da equação.

$$D = c * A^d \tag{123}$$

Sendo D a profundidade do canal, c o coeficiente da equação, e d o expoente da equação.

Com base nas equações, nota-se que, conforme o procedimento descrito por Chapra e Canale (2016), é possível encontrar os valores de a , b , c e d por meio da linearização das curvas algebricamente tratadas pelas equações 122 e 123, seguida pela regressão linear. Os dados de largura e de profundidade, obtidos a partir de uma série de perfis transversais, são assumidamente relacionados com os dados de área de drenagem, de modo que possa ser então adotada a linearização por logaritmos neperianos, conforme as equações 124 e 125.

$$LN(W) = LN(a) + b * LN(A) \tag{124}$$

Sendo LN o símbolo para logaritmo neperiano.

$$LN(D) = LN(c) + d * LN(A) \tag{125}$$

Vendo-se que as equações 124 e 125 estão respectivamente relacionadas às equações 122 e 123, e que ambas seguem o padrão de funções lineares (do 1º grau), tal qual a equação 126 busca demonstrar, entende-se que o próximo passo a ser dado é a regressão linear.

$$y = u + v * x \tag{126}$$

Sendo y a variável dependente, do eixo das ordenadas, u o termo independente, ou coeficiente linear da reta, v o coeficiente angular da reta, e x a variável da qual depende y e que é multiplicada por v .

Inserindo-se a sequência de dados de $LN(W)$ e de $LN(D)$ no eixo y , ao mesmo tempo em que se colocam os valores correspondentes de $LN(A)$ no eixo x , tem-se que $LN(a)$ e $LN(c)$ equivalem ao coeficiente linear u , enquanto que b e d equivalem ao coeficiente angular v . Portanto, fazem-se verdadeiras as equações 127, 128, 129 e 130.

$$a = e^{u_w} \quad (127)$$

Sendo e o número de Euler, e u_w o coeficiente linear para a curva de largura do canal em função da área de drenagem.

$$b = v_w \quad (128)$$

Sendo v_w o coeficiente angular para a curva de largura do canal em função da área de drenagem.

$$c = e^{u_d} \quad (129)$$

Sendo u_d o coeficiente linear para a curva de profundidade do canal em função da área de drenagem.

$$d = v_d \quad (130)$$

Sendo v_d o coeficiente angular para a curva de profundidade do canal em função da área de drenagem.

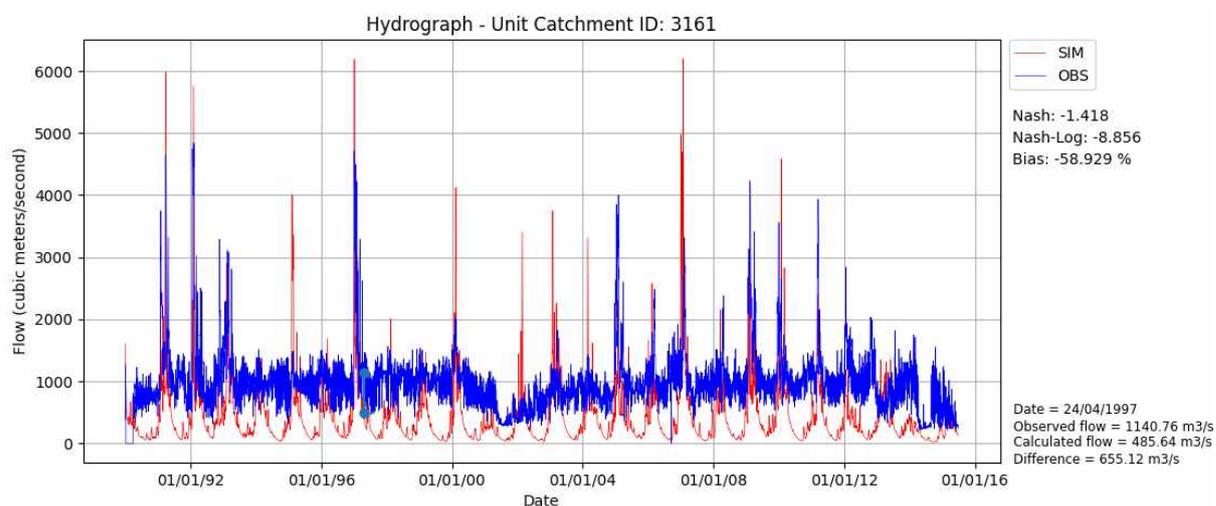
Gerando os gráficos de dispersão para cada um dos casos (função da largura do canal pela área de drenagem e da profundidade do canal pela área de drenagem), solicitam-se, com suas respectivas equações, as linhas de tendência no formato linear, verificando-se os valores de u_w , v_w , u_d e v_d para aplica-los nas equações 127, 128, 129 e 130, de modo a se calcularem os parâmetros das relações geomórficas.

Perceba-se que tais cálculos entregam os valores de a , b , c e d que melhor se encaixam nas curvas da largura do canal em função da área de drenagem e da profundidade do canal em função da área de drenagem. Sabido seja que estes passos podem executados em uma planilha do Excel.

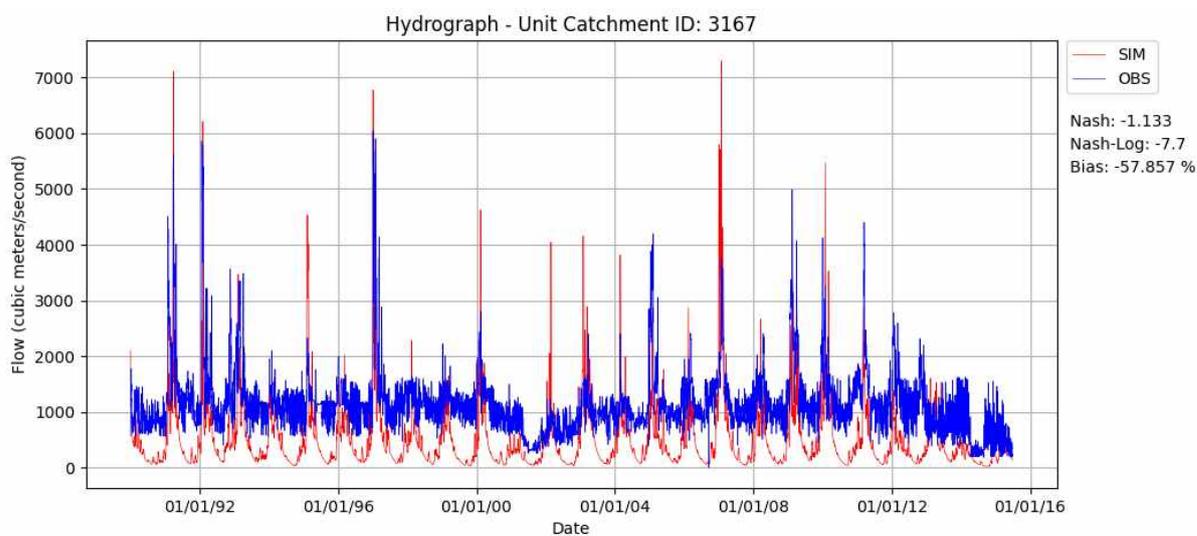
APÊNDICE A – Resultados adicionais da simulação não calibrada do MGB

Os gráficos numerados de 30 a 42 expõem os resultados gerados pelo modelo MGB quando da simulação não calibrada do período de 01/01/1990 a 29/06/2015 na bacia do Rio Grande. Como esperado, os resultados apontam para simulações distantes da realidade, pelo fato de o modelo não ter sido calibrado.

GRÁFICO 30 - Comparação dos hidrogramas simulados e observados para os postos (a) 61760080 e (b) 61796080



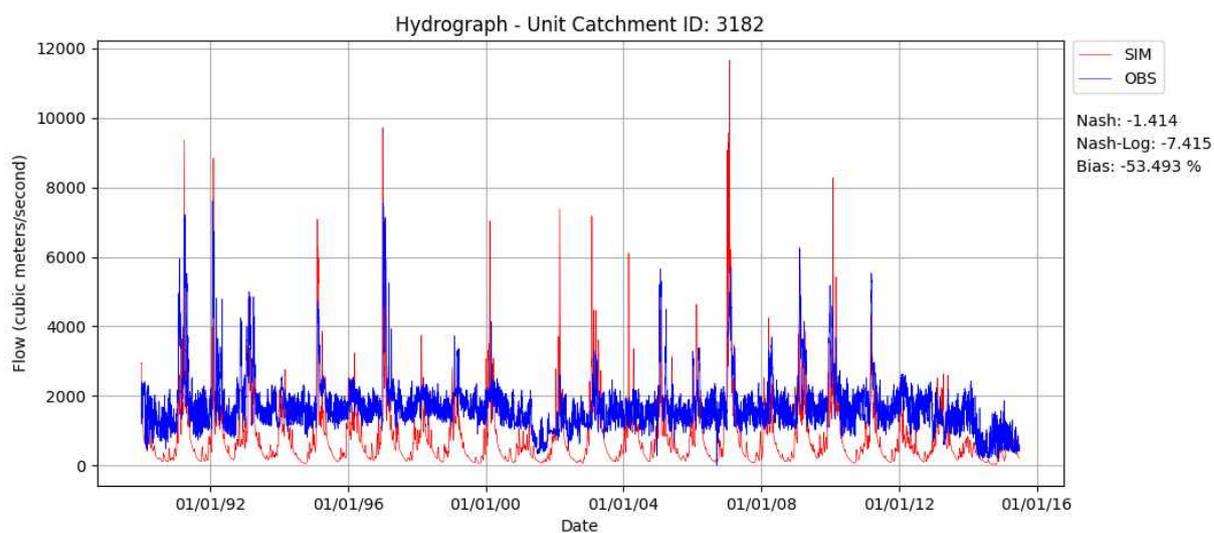
(a)



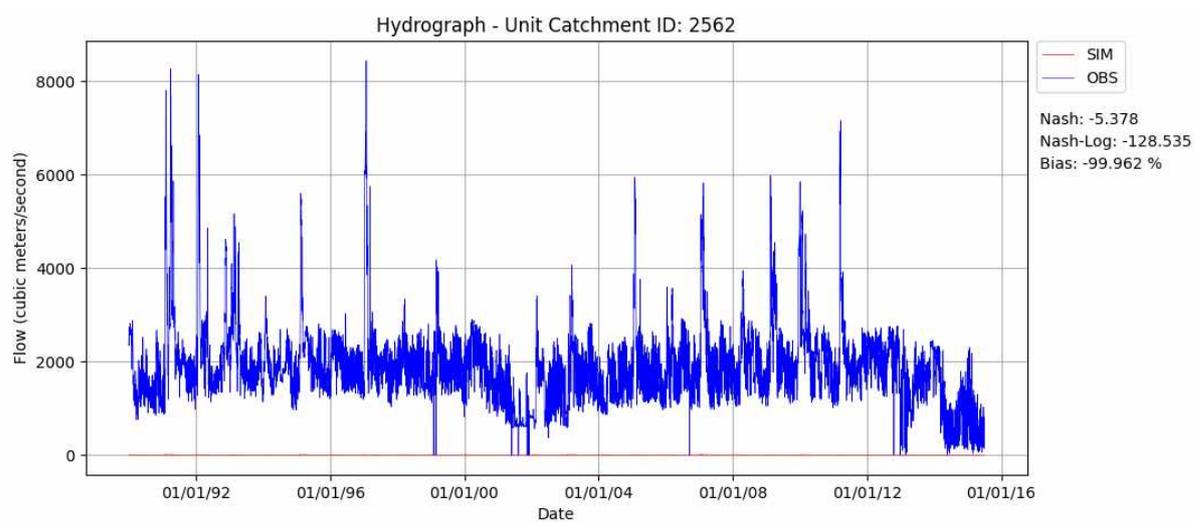
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 31 - Comparação dos hidrogramas simulados e observados para os postos (a) 61941080 e (b) 61998080



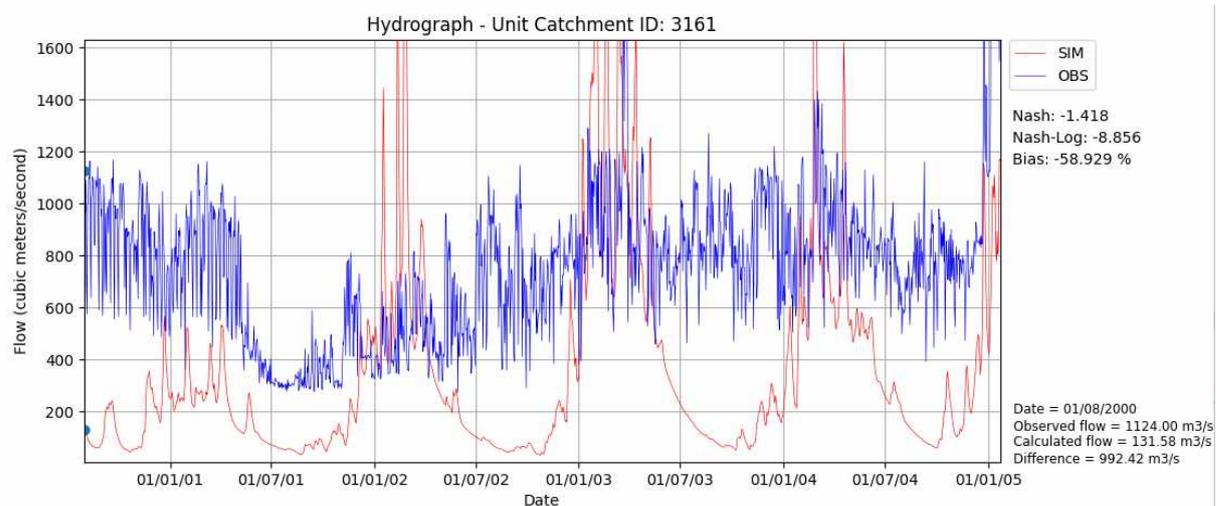
(a)



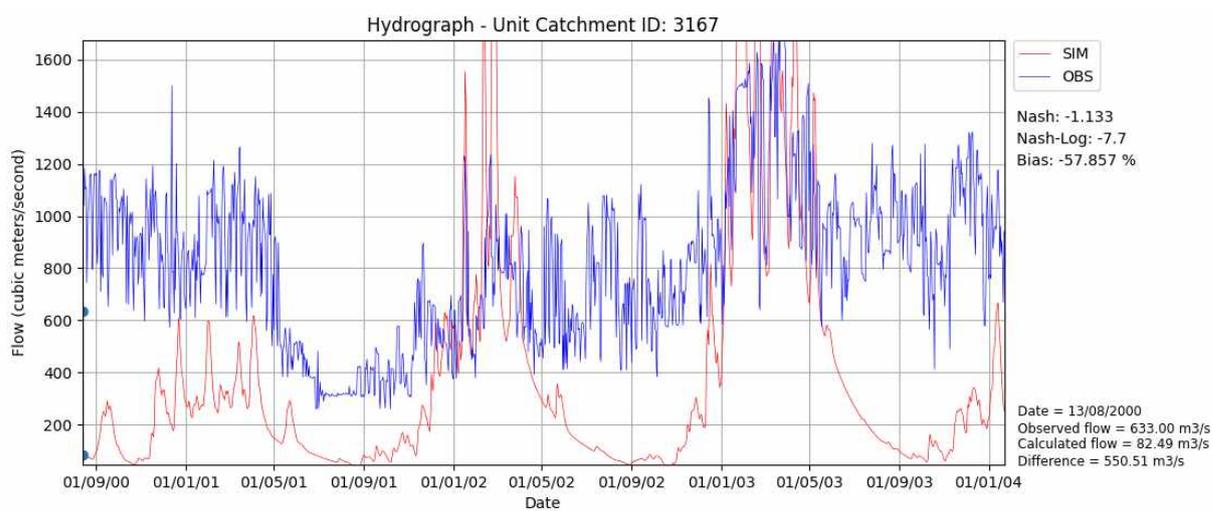
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 32 - Detalhes da comparação dos hidrogramas simulados e observados para os postos (a) 61760080 e (b) 61796080



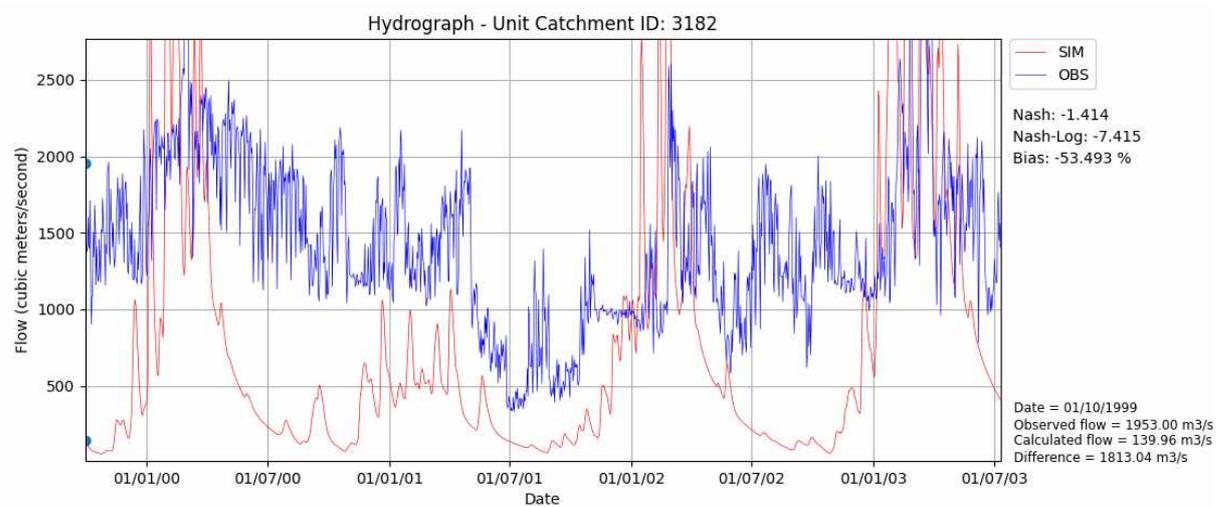
(a)



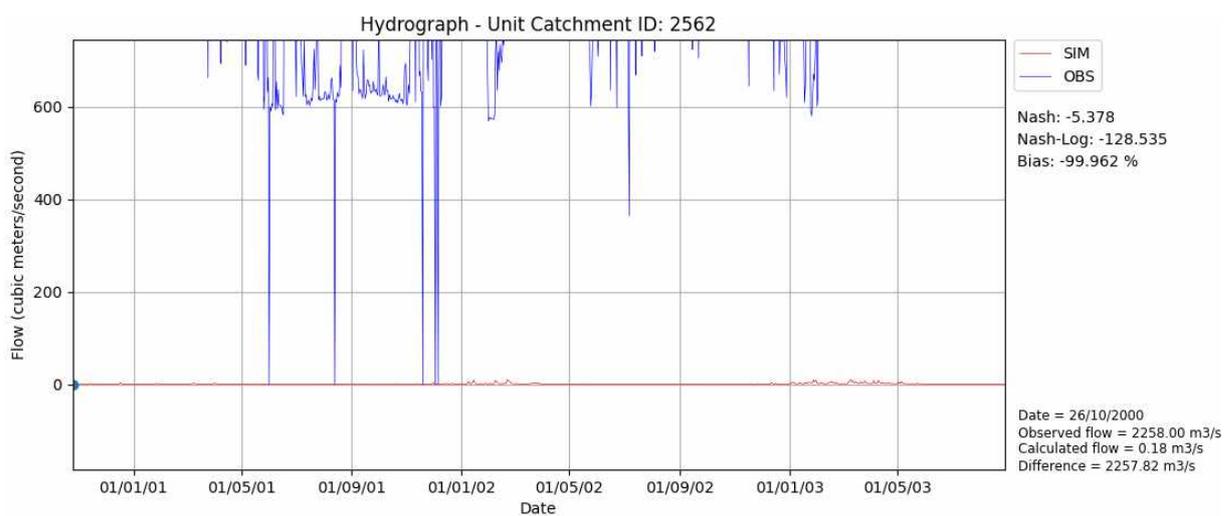
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 33 - Detalhes da comparação dos hidrogramas simulados e observados para os postos (a) 61941080 e (b) 61998080



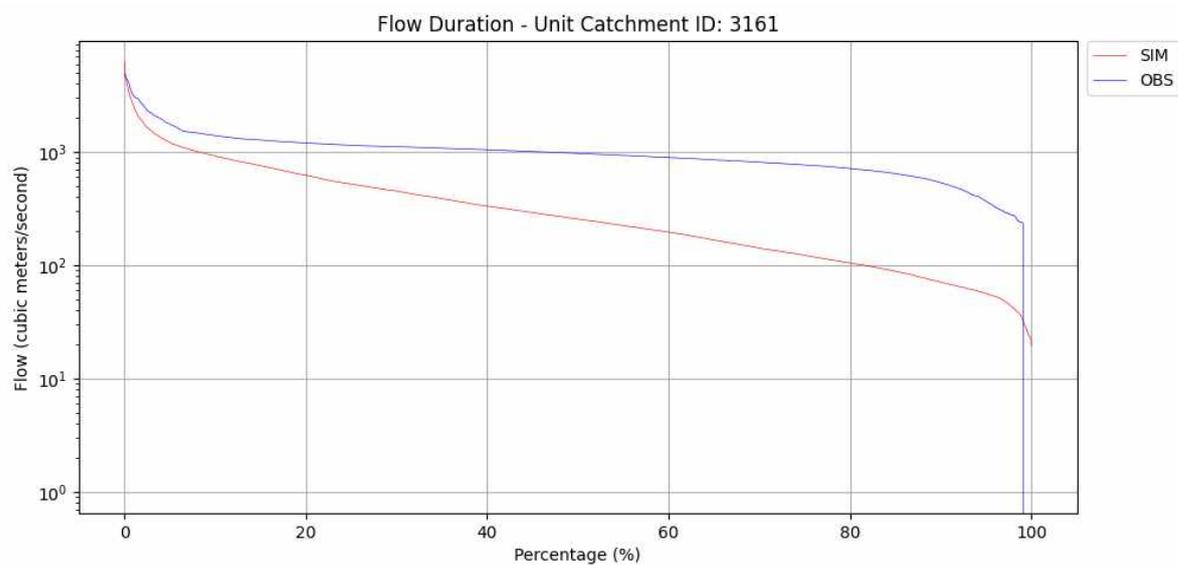
(a)



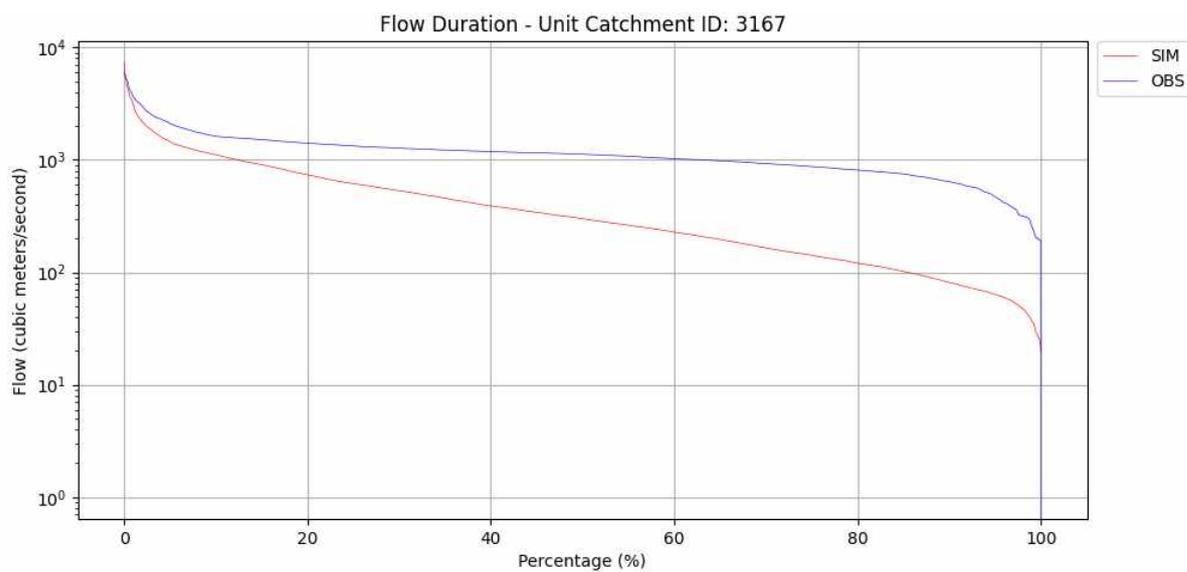
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 34 - Comparação das curvas de permanência simuladas e observadas para os postos (a) 61760080 e (b) 61796080



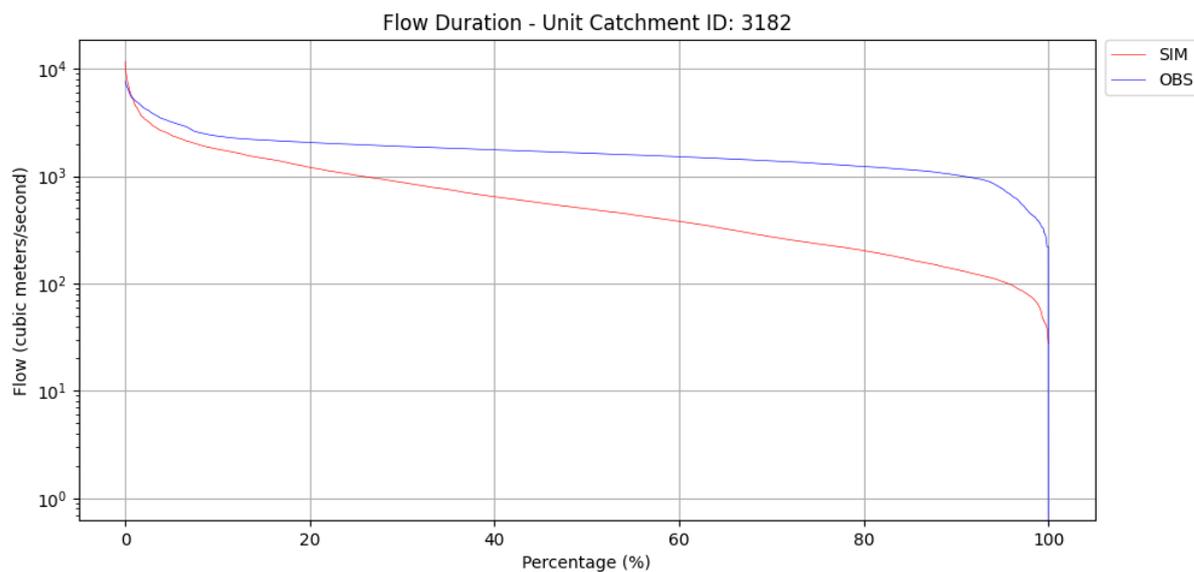
(a)



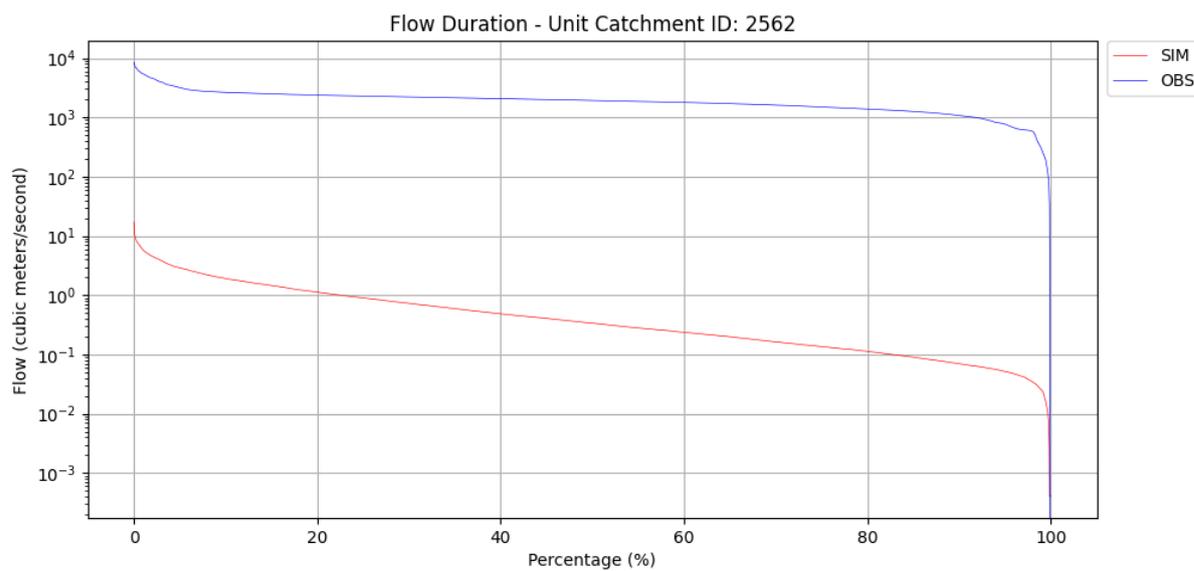
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 35 - Comparação das curvas de permanência simuladas e observadas para os postos (a) 61941080 e (b) 61998080



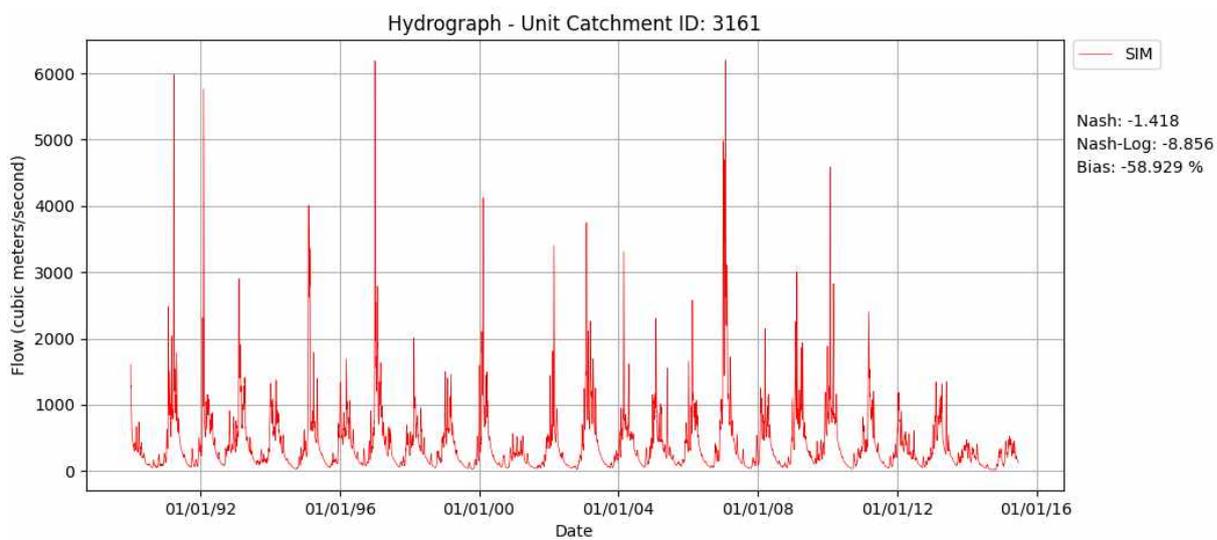
(a)



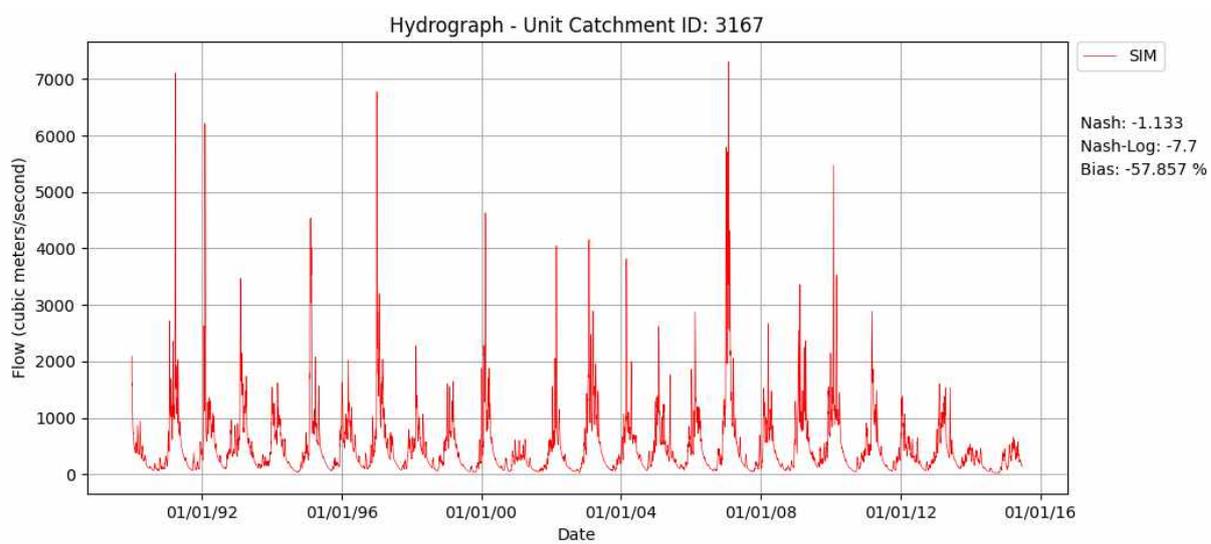
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 36 - Hidrogramas simulados para os postos (a) 61760080 e (b) 61796080



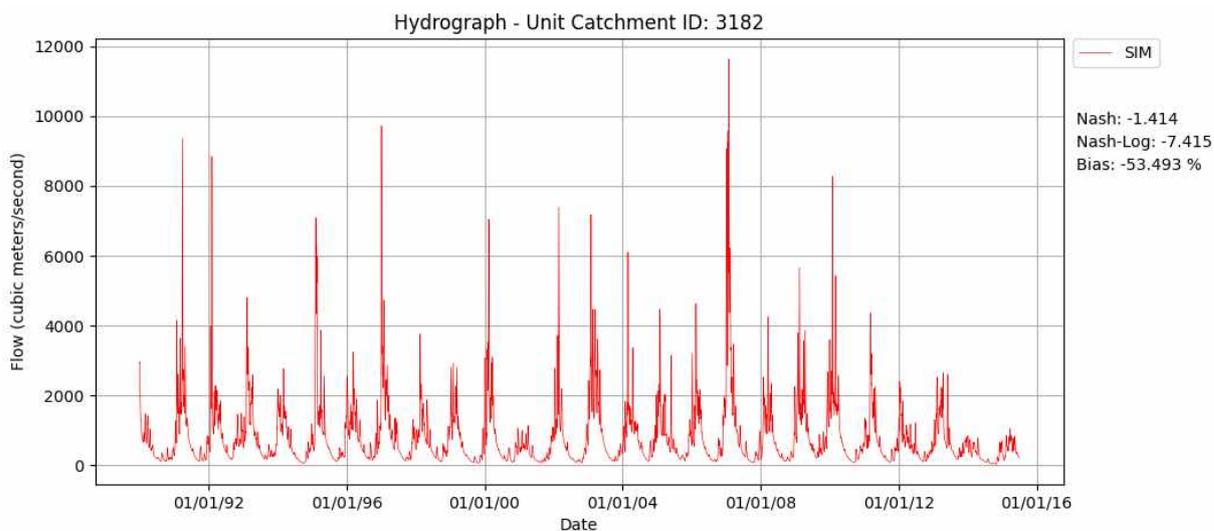
(a)



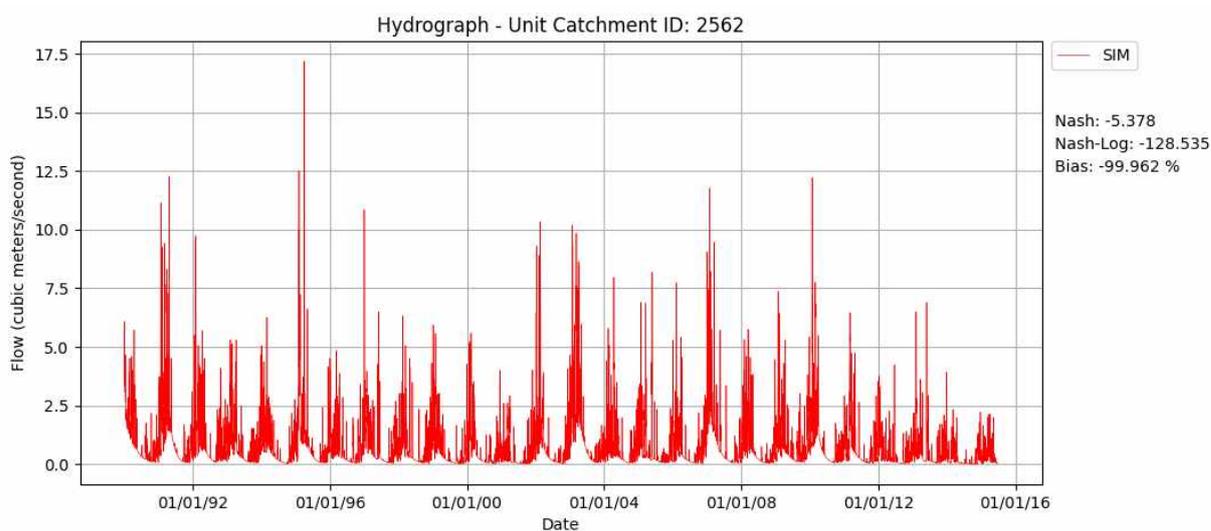
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 37 - Hidrogramas simulados para os postos (a) 61941080 e (b) 61998080



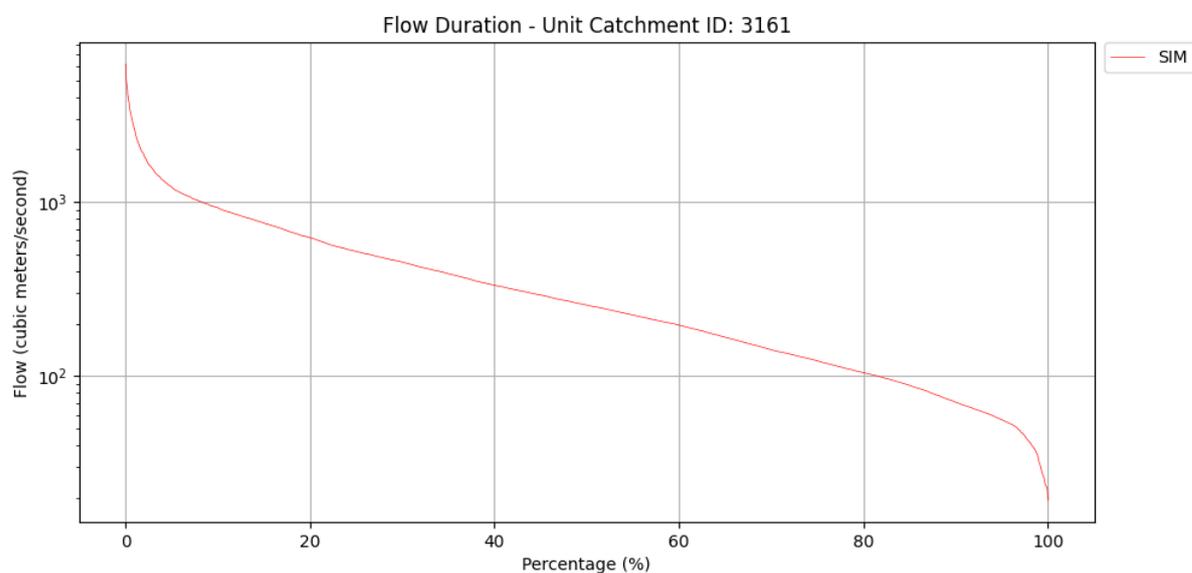
(a)



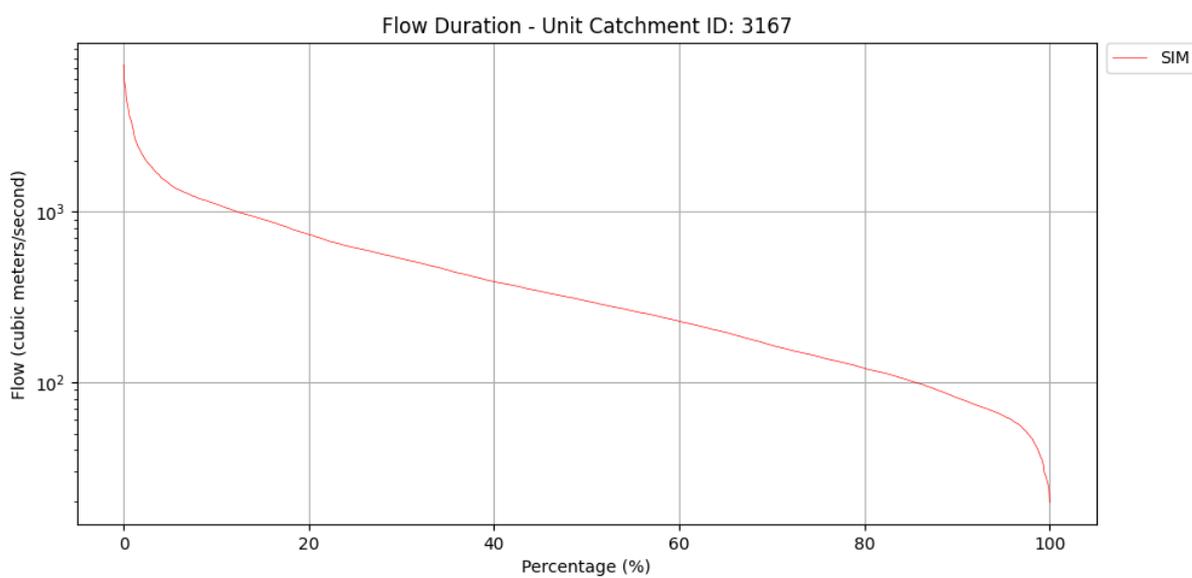
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 38 - Curvas de permanência simuladas para os postos (a) 61760080 e (b) 61796080



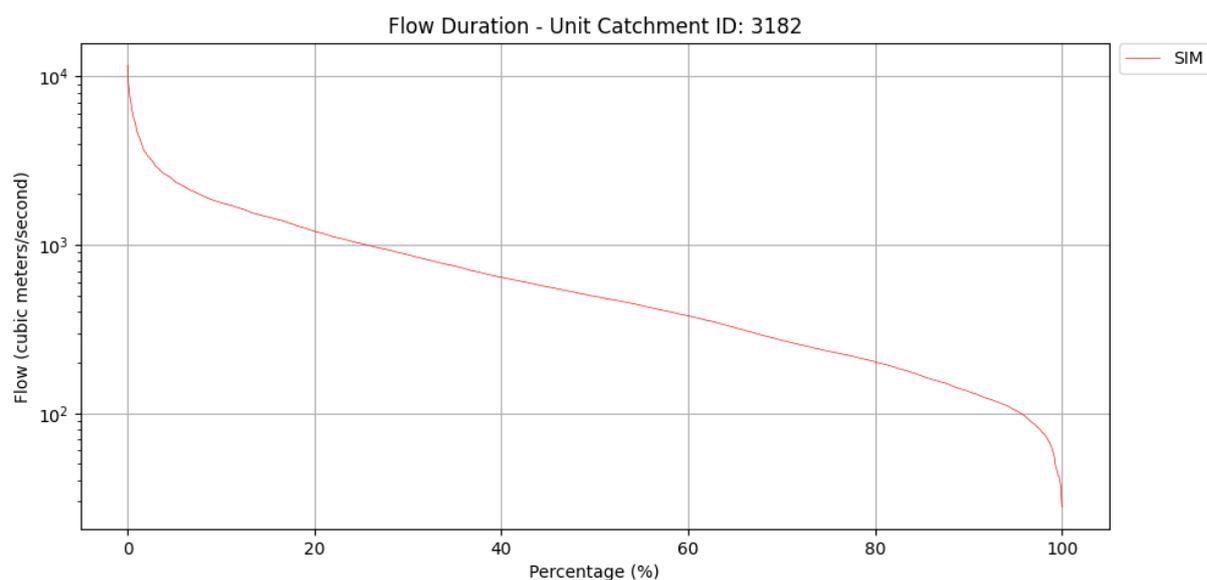
(a)



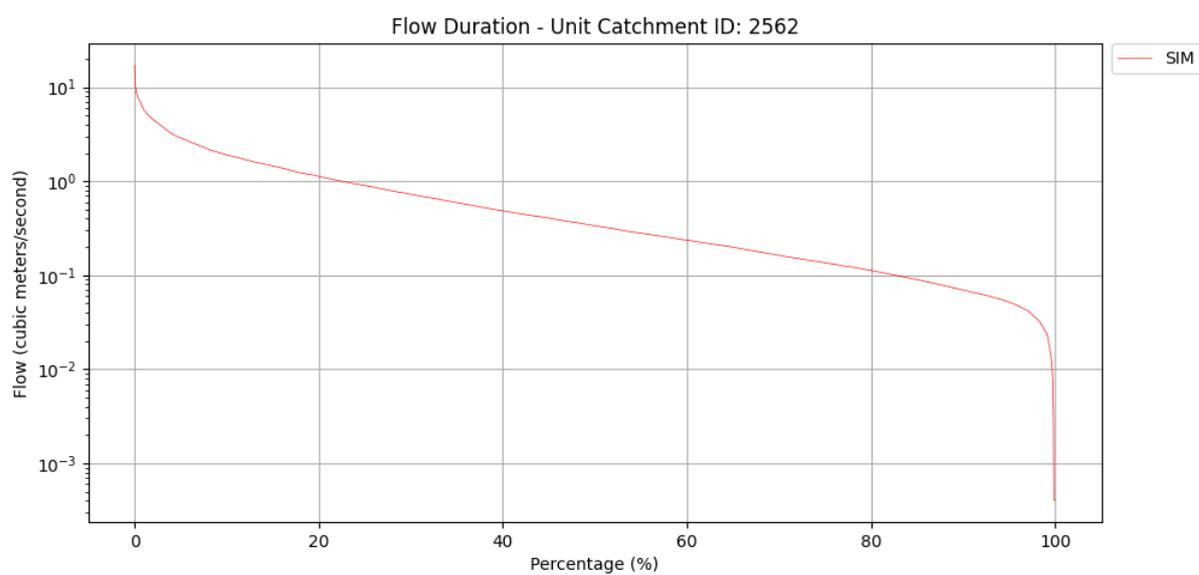
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 39 - Curvas de permanência simuladas para os postos (a) 61941080 e (b) 61998080



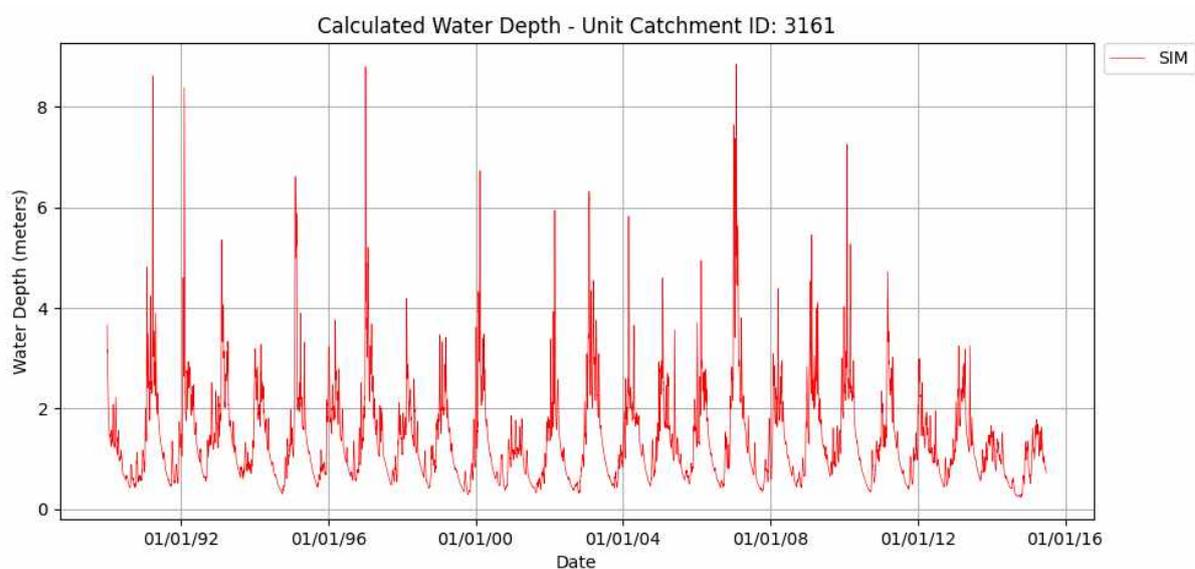
(a)



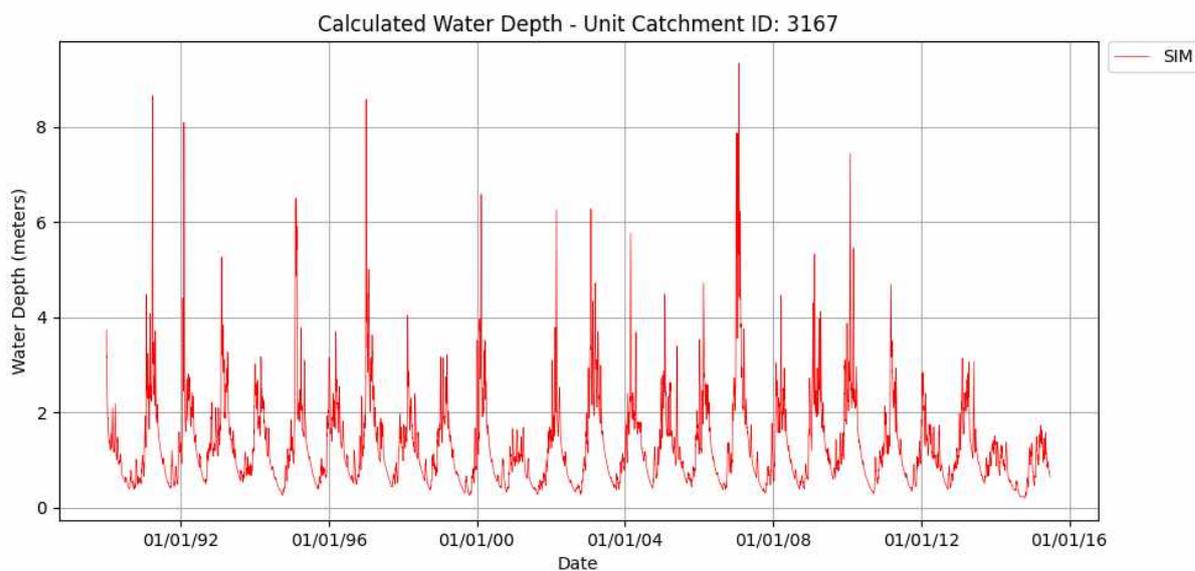
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 40 - Séries temporais do nível de água simuladas para os postos (a) 61760080, (b) 61796080



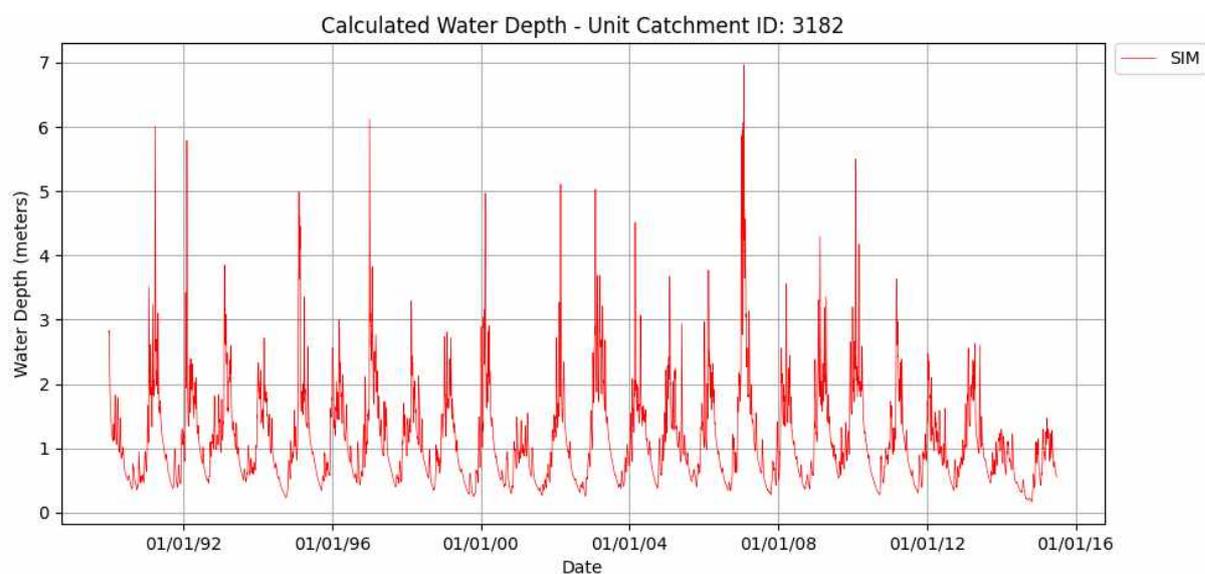
(a)



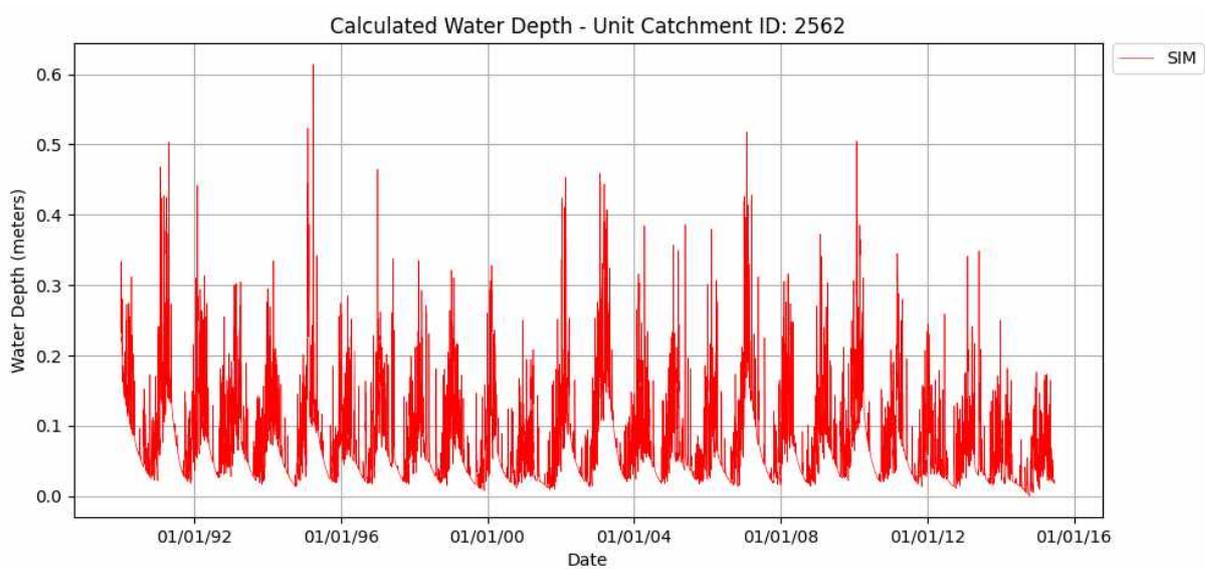
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 41 - Séries temporais do nível de água simuladas para os postos (a) 61941080 e
(b) 61998080



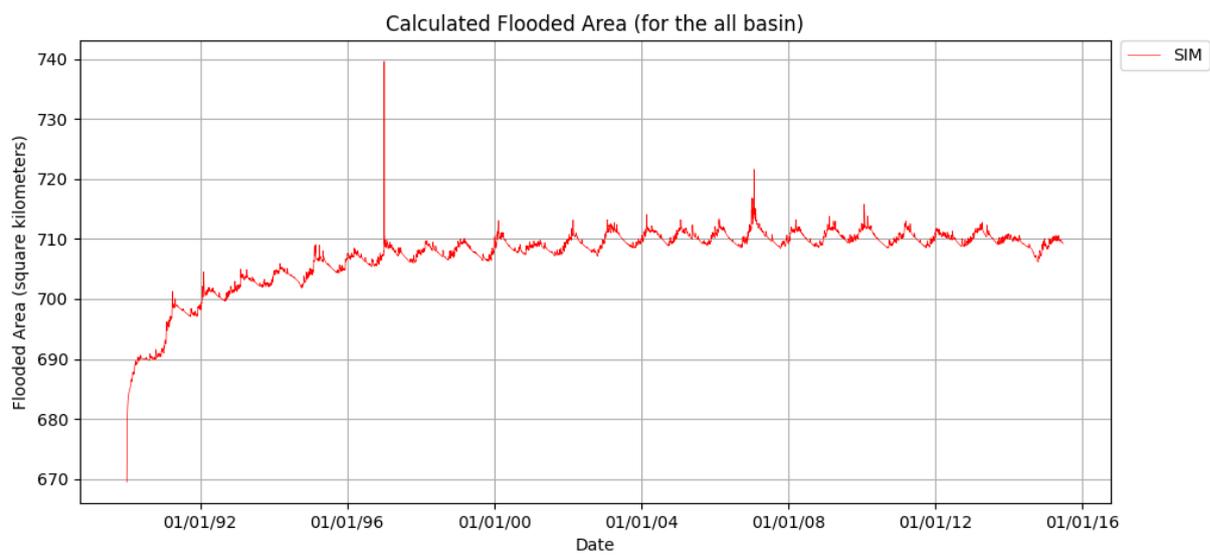
(a)



(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 42 - Série temporal das áreas inundadas

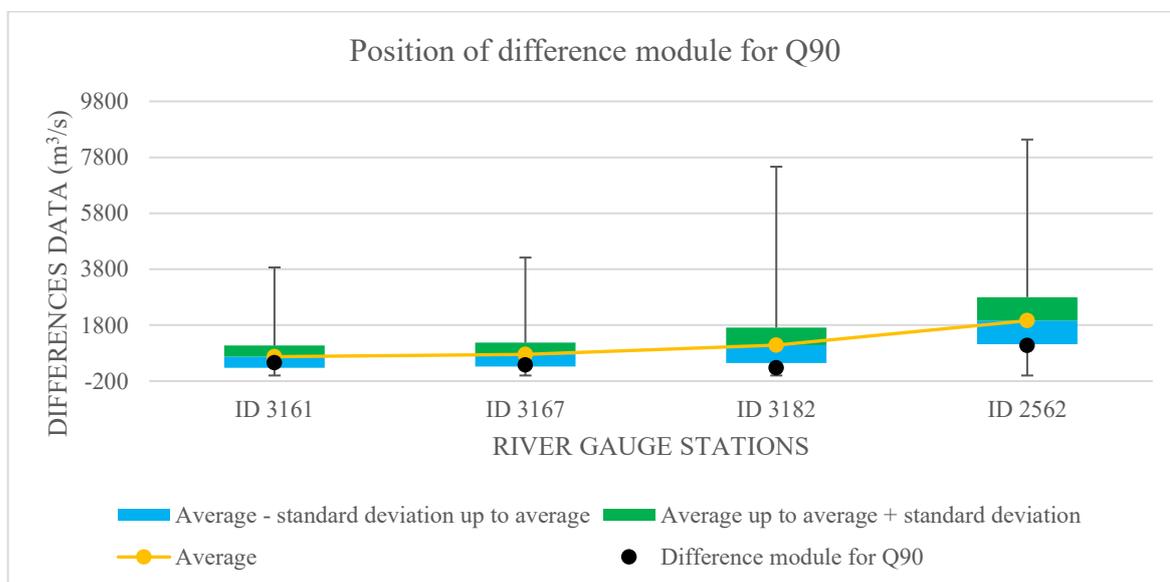


Fonte: O autor (2023).

APÊNDICE B – Análises adicionais dos resultados das métricas de desempenho

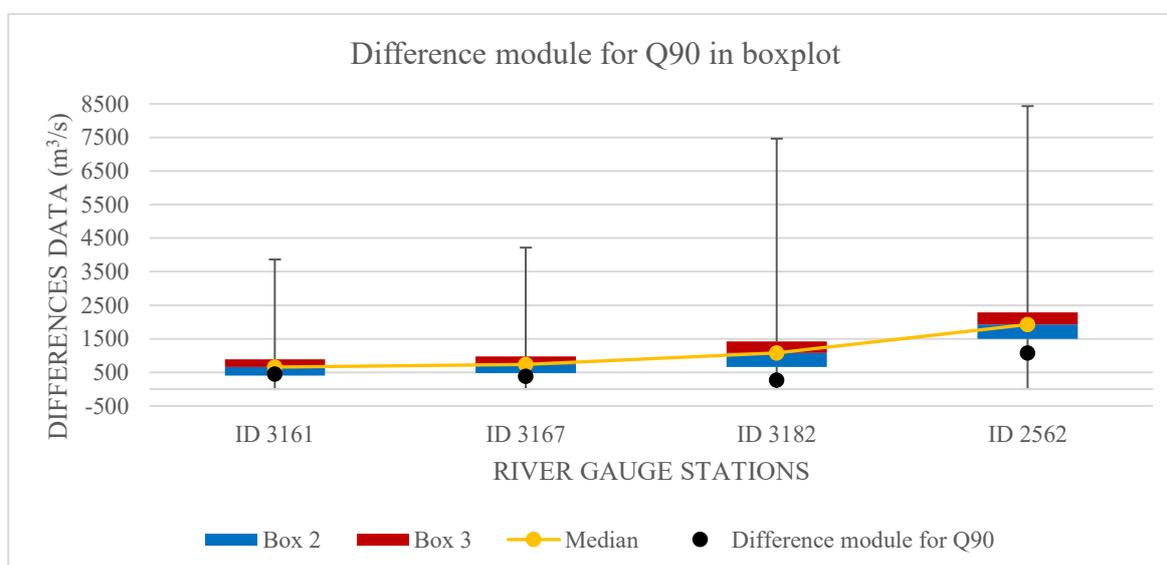
O Gráfico 43 situa o módulo da diferença para a vazão Q_{90} em relação à média e ao desvio padrão, e o Gráfico 44 é um *boxplot* elaborado para os módulos das diferenças.

GRÁFICO 43 - Posição do módulo da diferença para a vazão Q_{90} em relação à média e ao intervalo do desvio padrão



Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 44 - *Boxplot* dos módulos das diferenças



Fonte: O autor (2023).

Como já é sabido, todos os módulos foram inferiores à média. No posto ID 3161, tal módulo é igual a 454,517815, e figura acima do valor da média subtraída do desvio padrão. A média determinada para esta estação é de 672,842533, sendo o desvio padrão de 396,666585 e a diferença entre ambos de 276,175948. No *boxplot*, o módulo também se mostra inferior à mediana (656,792603) e superior ao quartil 25% (406,554909).

O posto ID 3161 apresenta o valor máximo do módulo (3863,615234) muito destoante, como acontece em todas as estações. Em contrapartida, seu valor mínimo (0,389160) é menos divergente, obedecendo também à tendência geral dos postos.

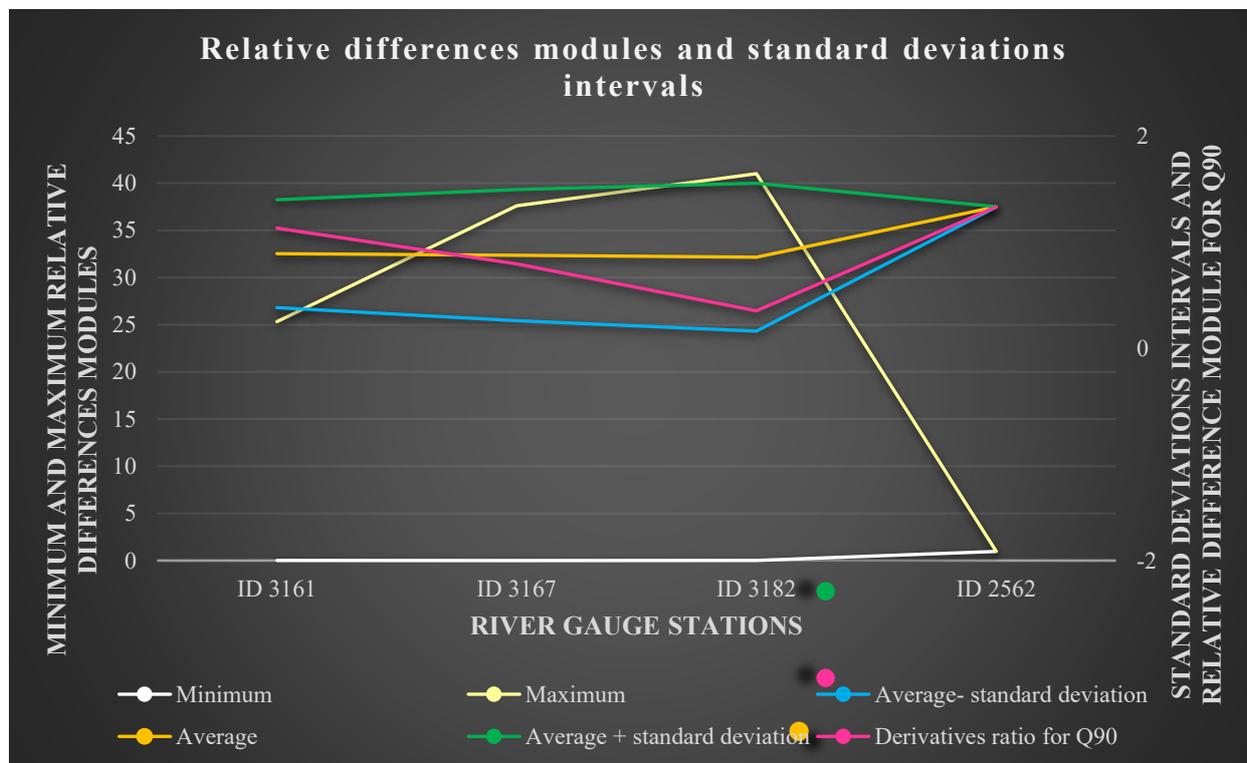
Na estação ID 3167, o módulo da diferença para a vazão Q_{90} é de 381,864594, estando no intervalo entre a diferença da média e o desvio padrão (322,996263) e a média (748,827750), sendo esse desvio igual a 425,831488. Ao mesmo tempo, o módulo figura abaixo da mediana (736,209962) e do quartil 25% (477,132507). Novamente, o valor máximo do conjunto (4216,655273) é muito mais destoante do que seu valor mínimo (0,054962).

No posto ID 3182, o módulo da diferença é de 270,497620, ficando abaixo da média (1079,717177) e do valor da diferença da média subtraída do desvio padrão (441,697697), sendo o desvio igual a 638,019480. O módulo também está abaixo da mediana (1074,418228) e do quartil 25% (659,832016). O valor máximo (7465,262695) é muito mais divergente do conjunto do que o menor deles (0,338013).

Por último, a estação ID 2562 revela um módulo da diferença (1075,610260) para Q_{90} inferior à média (1959,464404) e à diferença entre a média e o desvio padrão (1117,129548), sendo o desvio padrão para o conjunto igual a 842,334856. Concomitantemente, nota-se no *boxplot* ser o módulo inferior à mediana (1924,936688) e ao quartil 25% (1495,922332). O dado máximo para este posto é o maior de todos os valores máximos, sendo de 8434,796041 e muito mais destoante que o valor mínimo, de 0,030358.

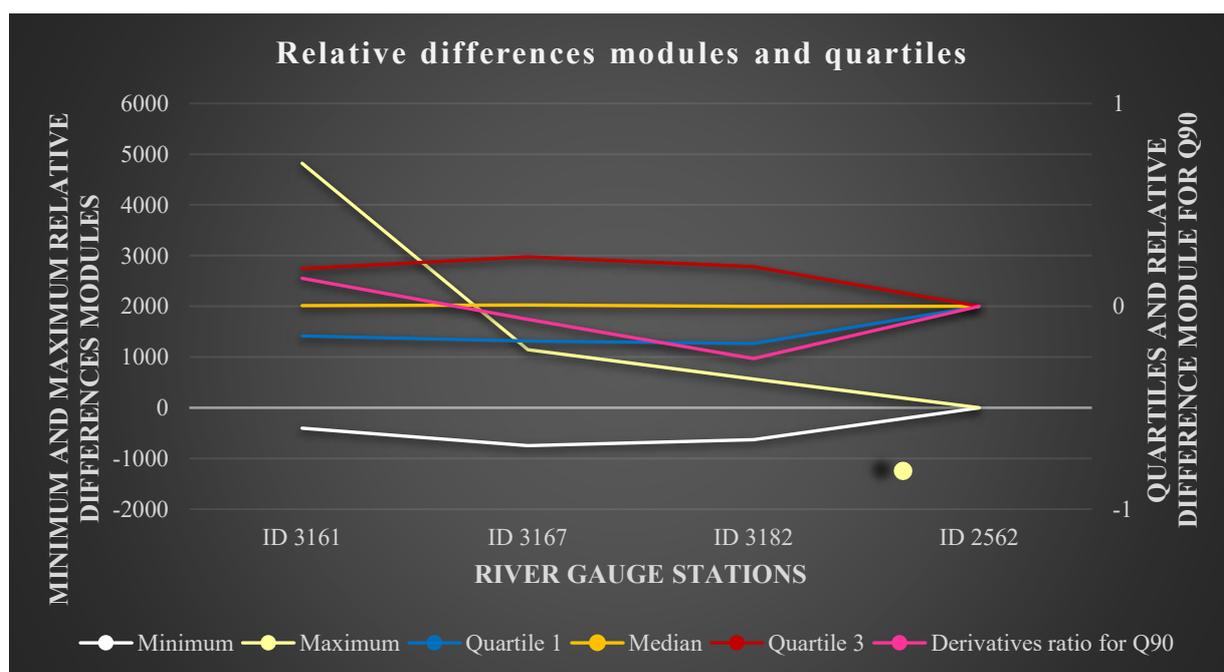
O Gráfico 45 situa o módulo da diferença para a vazão Q_{90} em relação à média de todos os módulos e também ao intervalo delimitado pelo desvio padrão. Ao mesmo tempo, o Gráfico 46 mostra a posição do mesmo módulo diante dos quartis 25%, 50% e 75%.

GRÁFICO 45 - Posição do módulo da diferença relativa para a vazão Q_{90} em relação à média e ao intervalo do desvio padrão



Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 46 - Posição do módulo da diferença relativa para a vazão Q_{90} em relação à mediana e aos quartis 25% e 75%



Fonte: O autor (2023).

No posto ID 3161, tal módulo relativo é igual a 0,847981, e figura abaixo do valor da média somada ao desvio padrão e acima da média determinada para esta estação, que é de 0,669358, sendo o desvio padrão de 0,381150 e a soma ambos de 1,050509. Quanto aos quartis, o módulo também se mostra superior à mediana (0,724494) e muito pouco inferior ao quartil 75% (0,862560).

O posto ID 3161 apresenta o valor máximo do módulo (25,334661) muito destoante, como acontece em todas as estações. Em contrapartida, seu valor mínimo (0,000670) é menos divergente, obedecendo também à tendência geral dos postos.

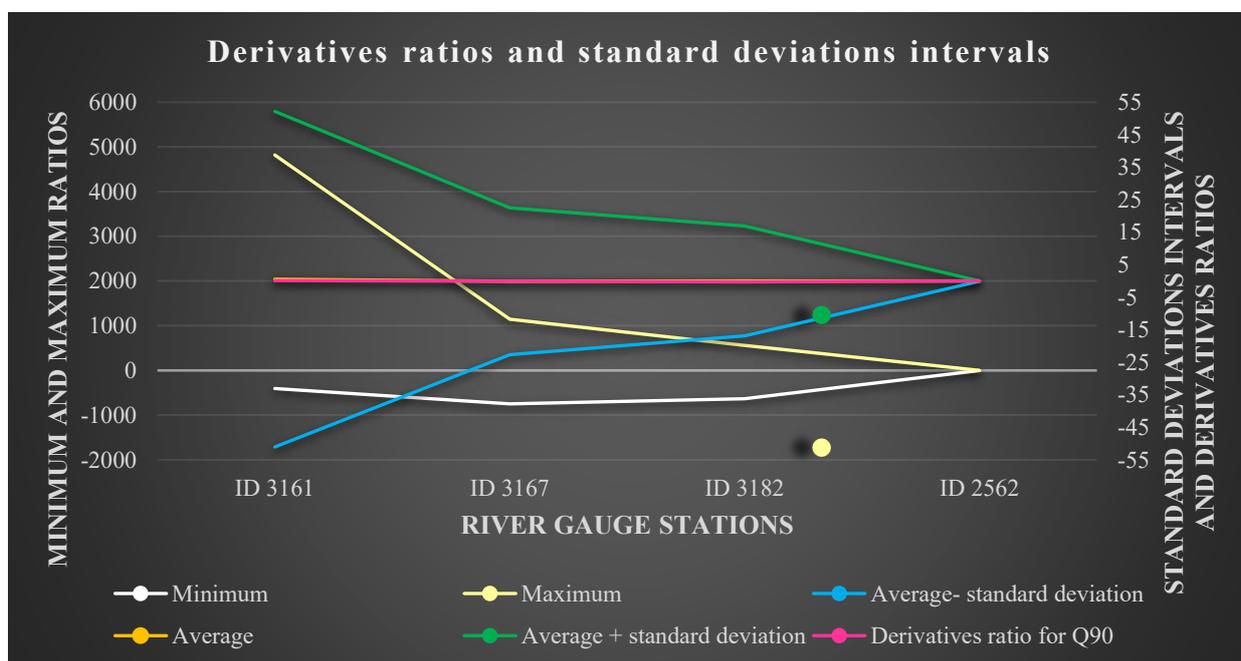
Na estação ID 3167, o módulo relativo para a vazão Q_{90} é de 0,596663, estando no intervalo entre a diferença da média e o desvio padrão (0,194297) e a média (0,657857), sendo esse desvio igual a 0,463559. Ao mesmo tempo, o módulo figura abaixo da mediana (0,706267) e acima do quartil 25% (0,494793). Novamente, o valor máximo do conjunto (37,602219) é muito mais destoante do que seu valor mínimo (0,000110).

No posto ID 3182, o módulo relativo da diferença é de 0,264675, ficando abaixo da média (0,643742) e acima do valor da diferença da média subtraída do desvio padrão (0,121459), sendo o desvio igual a 0,522284. O módulo também está abaixo da mediana (0,684884) e do quartil 25% (0,465743). O valor máximo (41,006321) é muito mais divergente do conjunto do que o menor deles (0,000207).

Por último, a estação ID 2562 revela um módulo relativo da diferença (0,999638) para Q_{90} ligeiramente superior à média (0,999560) e inferior à soma da média com o desvio padrão (1,000439), sendo o desvio padrão para o conjunto igual a 0,000879. Concomitantemente, quanto aos quartis, o módulo é ligeiramente inferior à mediana (0,999813) e muito pouco superior ao quartil 25% (0,999517). O dado máximo para este posto é o maior de todos os valores máximos, sendo de 1,000000 e muito mais destoante que o valor mínimo, de 0,970670.

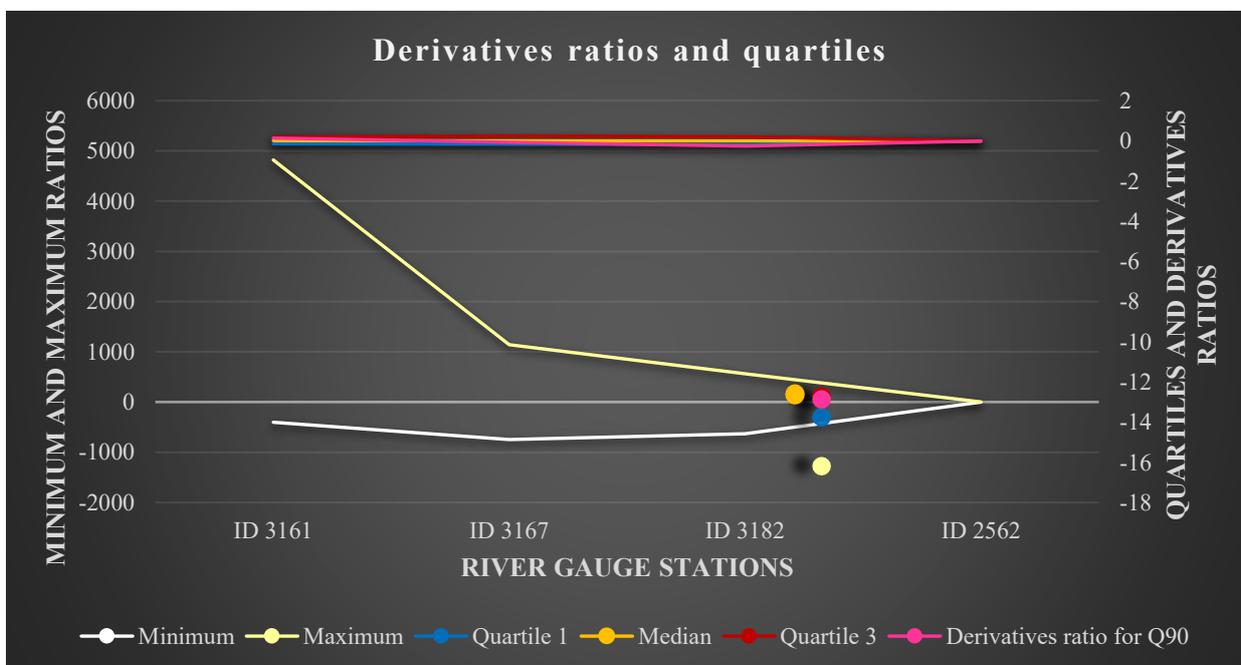
Complementando a análise dos resultados de X_5 , o Gráfico 47 situa a razão das derivadas estimadas para a vazão Q_{90} em relação à média de todas as razões e também ao intervalo delimitado pelo desvio padrão. Ao mesmo tempo, o Gráfico 48 mostra a posição da referida razão diante da mediana e dos quartis 25% e 75%.

GRÁFICO 47 - Posição da razão das derivadas estimadas para a vazão Q_{90} em relação à média e ao intervalo do desvio padrão



Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 48 - Posição da razão das derivadas estimadas para a vazão Q_{90} em relação à mediana e aos quartis 25% e 75%



Fonte: O autor (2023).

Nesses gráficos, todos os intervalos delimitados tanto pelo desvio padrão quanto pelos quartis são muito pequenos se comparados às amplitudes dos intervalos entre os valores mínimo e máximo de cada conjunto. Isso aponta para valores mínimos e máximos bastante destoantes.

No posto ID 3161, tem-se a razão entre as derivadas estimadas igual a 0,138321, estando abaixo da média (0,580993) e acima da diferença entre a média e o desvio padrão (-51,045620), sendo tal desvio de 51,626613. Em relação aos quartis e à mediana, a mesma razão figura acima da mediana (0,003415) e abaixo do quartil 75% (0,185902).

O valor máximo encontrado no conjunto é de 4820,701197, muito destoante da média, da mediana e dos intervalos delimitados pelo desvio padrão e pelos quartis 25% e 75%. O valor mínimo (-400,912750), embora ainda bastante divergente, é menos destoante.

Em ID 3167, -0,063667 é o valor da razão das derivadas estimadas, por sua vez ligeiramente superior à média (-0,069262) e muito inferior à soma da média com o desvio padrão (22,522499), para um desvio padrão de 22,591760. A razão ainda é menor que a mediana (0,006553) e maior que o quartil 25% (-0,171689). O dado máximo deste conjunto é 1143,978515, sendo um pouco mais destoante do que o valor mínimo (-747,280762).

No posto ID 3182, a razão de derivadas estimadas para a vazão Q_{90} é de -0,257558, sendo inferior à média (0,026477) e muito superior à diferença entre a média e o desvio padrão (-16,860277), para um desvio padrão de 16,886754. Quanto aos quartis, a dada razão é menor que o quartil 25% (-0,183287) e também que a mediana (-0,000475). Os valores mínimo e máximo encontrados são, na devida ordem, -629,170685 e 563,533691, sendo o menor valor o mais divergente, ao contrário dos casos anteriores.

Para ID 2562, -0,000232 é a média obtida, enquanto que 0,059020 é a soma da média com o desvio padrão, estando a razão para a vazão Q_{90} (0,000020) entre ambos os dados, e sendo o desvio padrão igual a 0,059252. Ao mesmo tempo, perante a mediana de -0,000004 e o quartil 75% de 0,000428, percebe-se que a razão está localizada também entre tais valores.

Os dados máximo e mínimo são respectivamente 1,633770 e -1,913955, sendo muito pouco destoantes em relação à média e à mediana, pelo menos em comparação com os demais casos já apresentados.

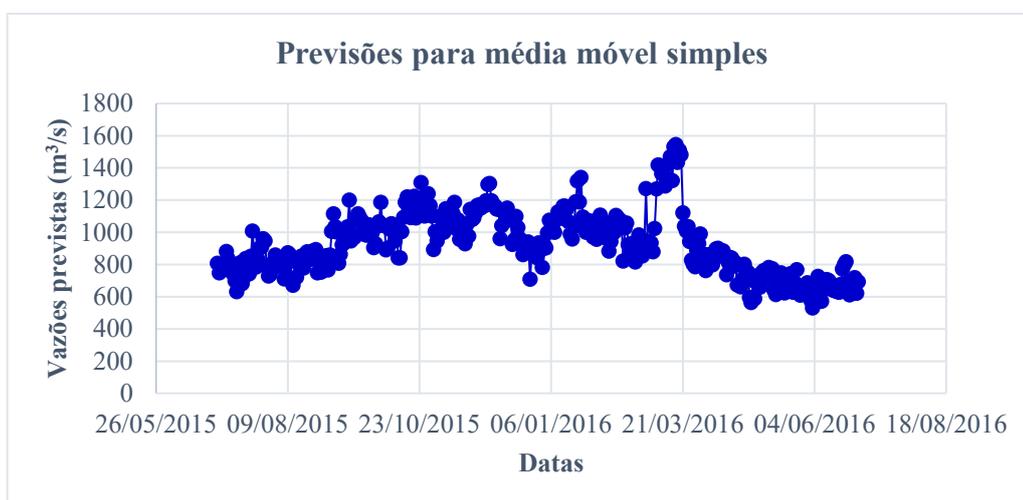
Nesse sentido é possível notar que a amplitude dos dados se reduz na sequência dos postos ID 3161, ID 3167, ID 3182 e ID 2562, passando pelos valores respectivos de 5221,613947, 1891,259277, 1192,704376 e 3,547724. O mesmo acontece pelo intervalo delimitado pelos valores da diferença e da soma entre a média e o desvio padrão, com os valores de 103,253226, 45,183521, 33,773508 e 0,118503.

Porém, para a margem estabelecida pelos quartis 25% e 75%, o cenário é um pouco diferente, e o decréscimo ocorre na sequência de estações ID 3167 (0,332521), ID 3182 (0,378876), ID 3161 (0,331548) e ID 2562 (0,000902). Apesar dessas diferenças, uma característica se mantém em todos os casos: a estação ID 2562 é sempre a que mostra os menores dados, tanto em termos da amplitude, quanto em relação aos intervalos margeados pelos limites impostos pelo desvio padrão ou pelos quartis 25% e 75%.

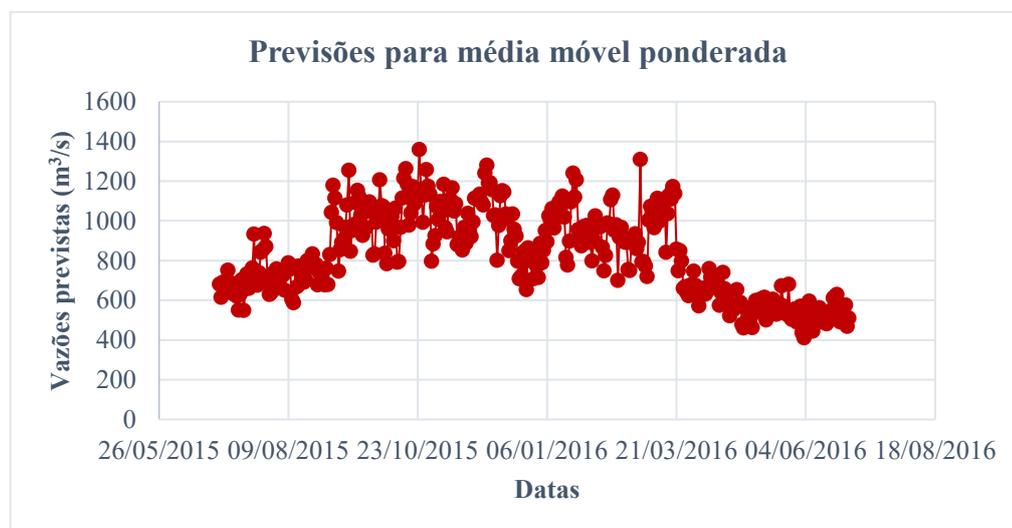
APÊNDICE C – Resultados e análises complementares das estimativas de vazões por médias móveis

Os gráficos elencados de 49 a 52 trazem as simulações com estimativas de vazões para o período de 30/06/2015 a 29/06/2016 através dos modelos estatísticos MMS e MMP. Já os gráficos de 53 a 61 representam os resultados das simulações feitas para as datas de 29/09, 29/12 e 30/03 através dos três métodos de média móvel nas estações ID 3167, ID 3182 e ID 2562.

GRÁFICO 49 - Simulações de previsão por média móvel para o posto ID 3161: (a) MMS e (b) MMP



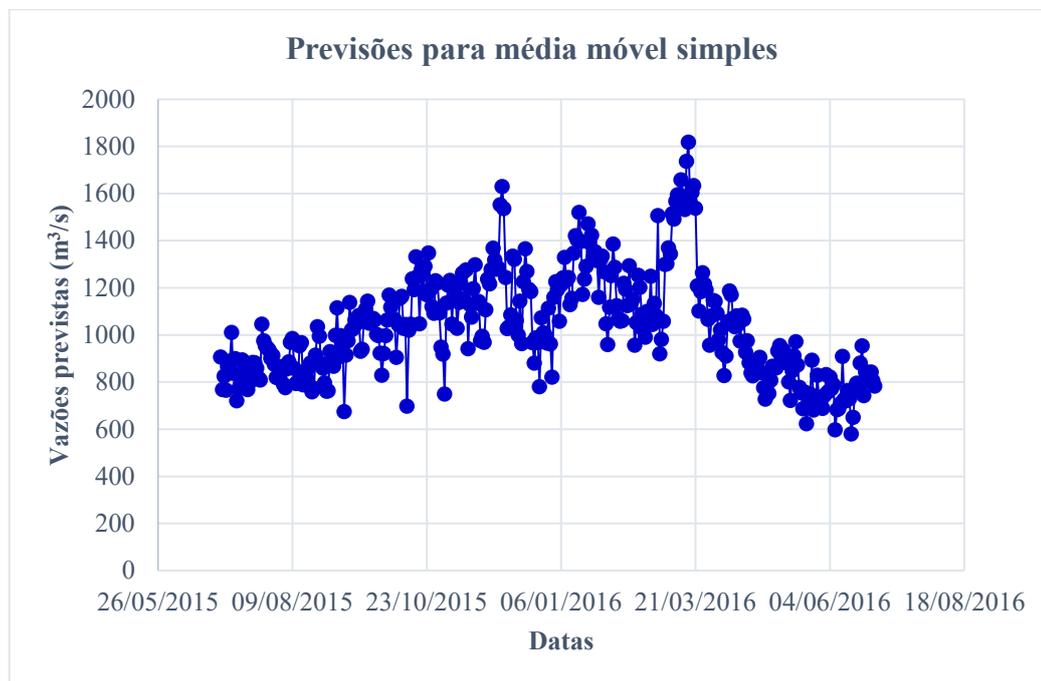
(a)



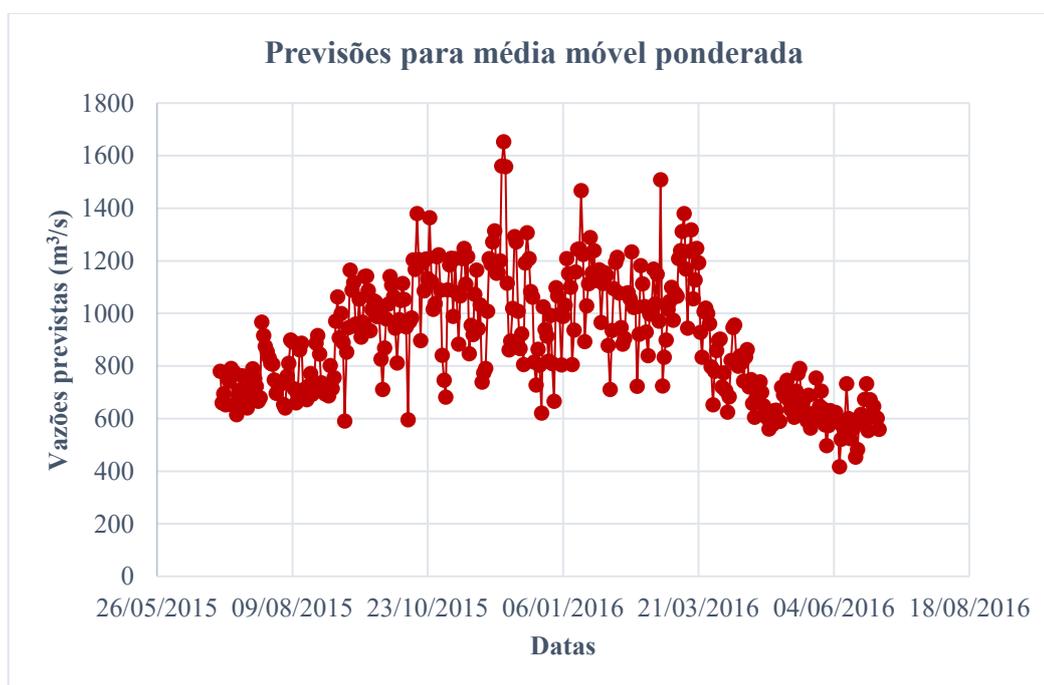
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 50 - Simulações de previsão por média móvel para o posto ID 3167: (a) MMS e
(b) MMP



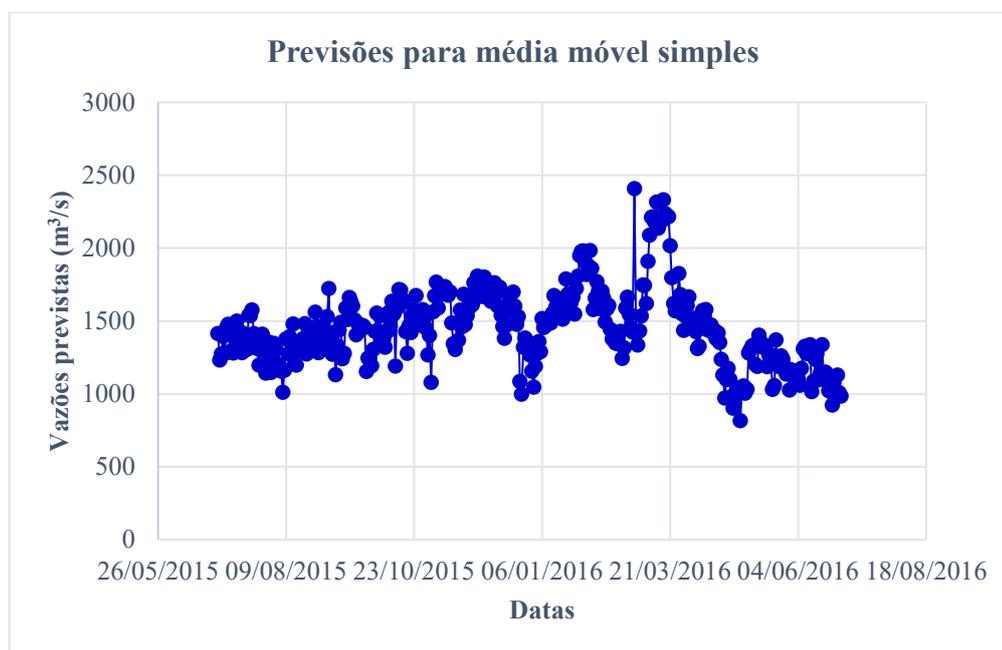
(a)



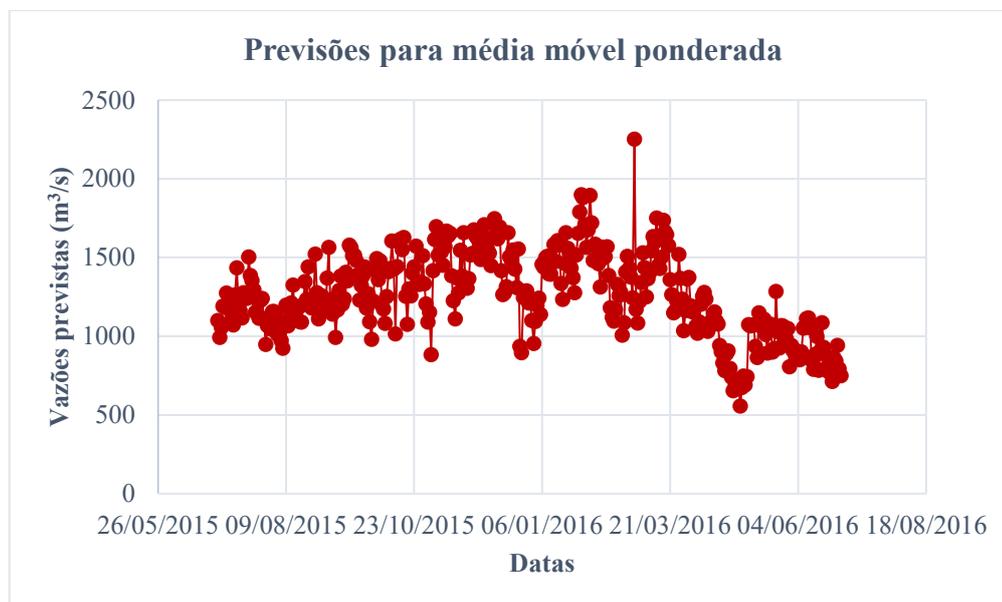
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 51 - Simulações de previsão por média móvel para o posto ID 3182: (a) MMS e
(b) MMP



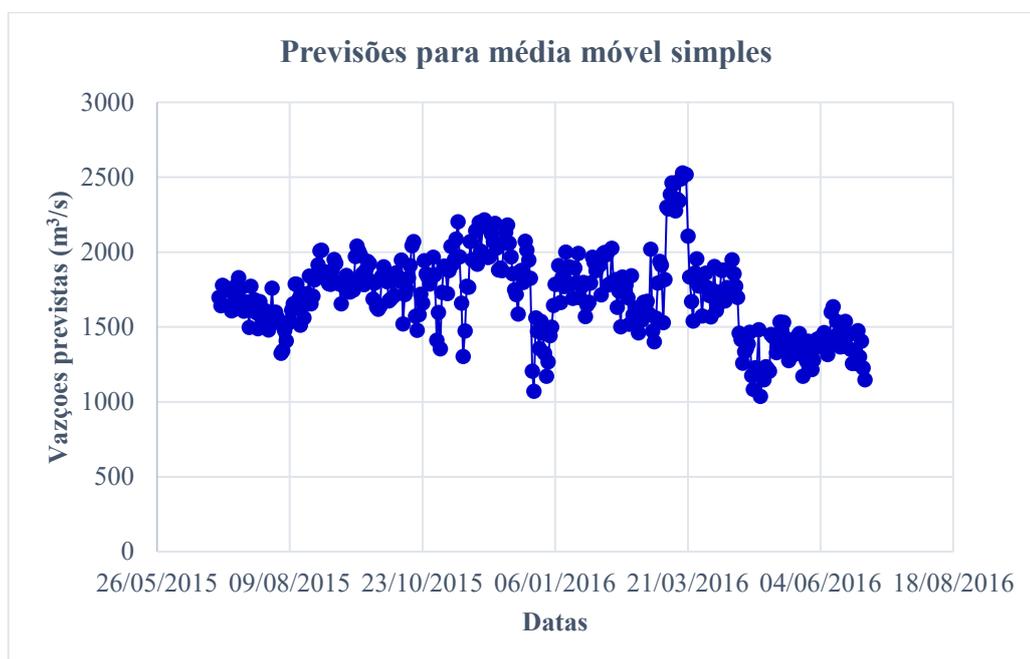
(a)



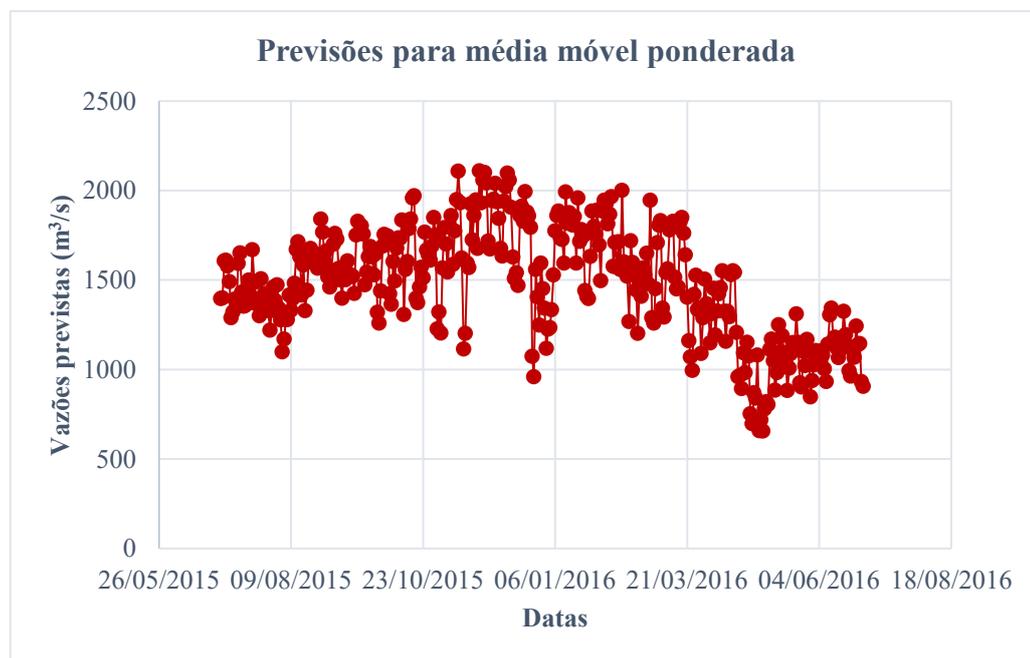
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 52 - Simulações de previsão por média móvel para o posto ID 2562: (a) MMS e
(b) MMP



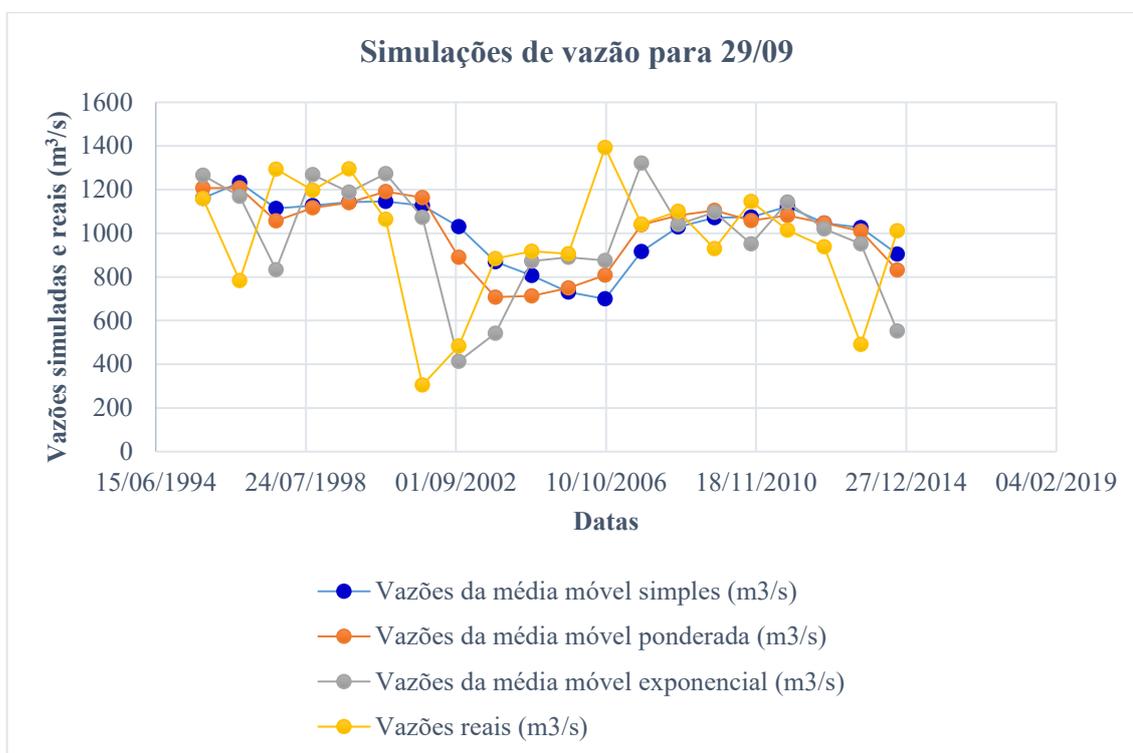
(a)



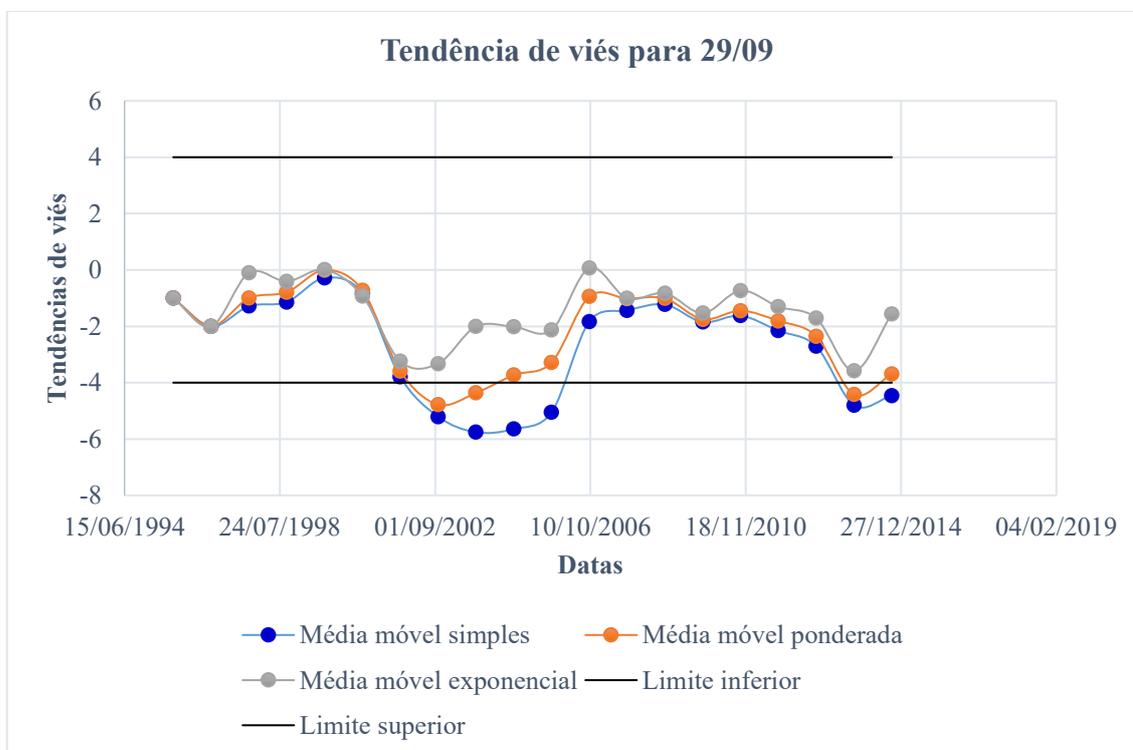
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 53 - (a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 29/09 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3167



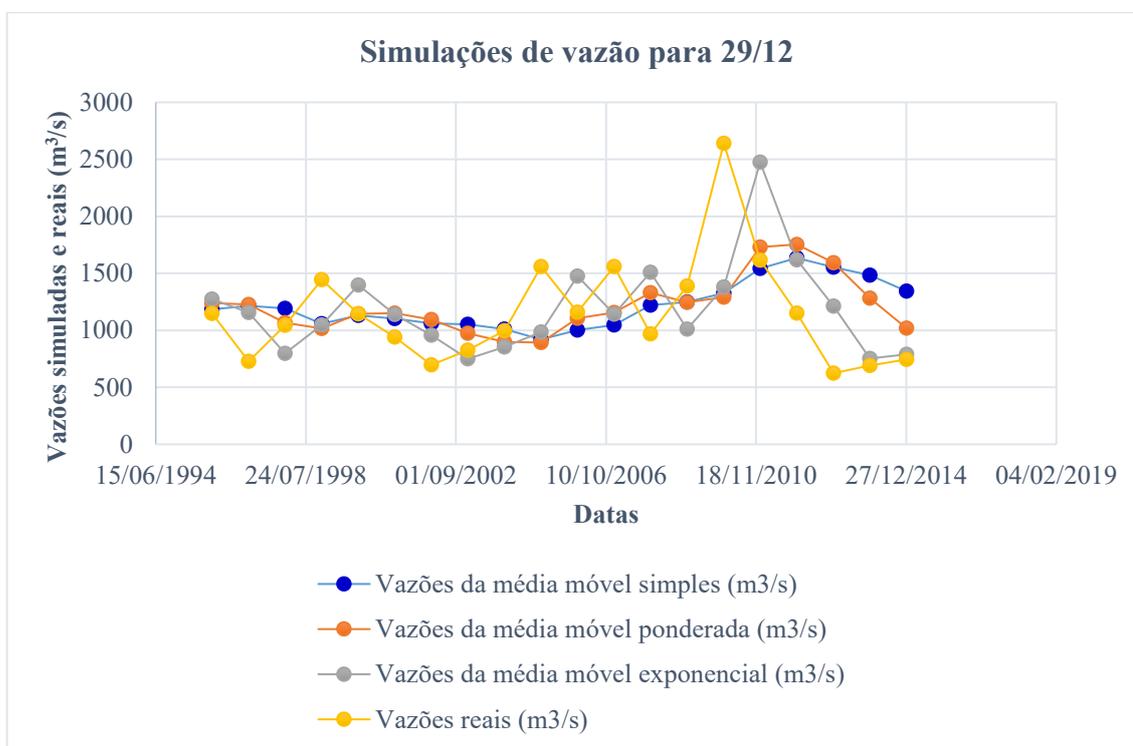
(a)



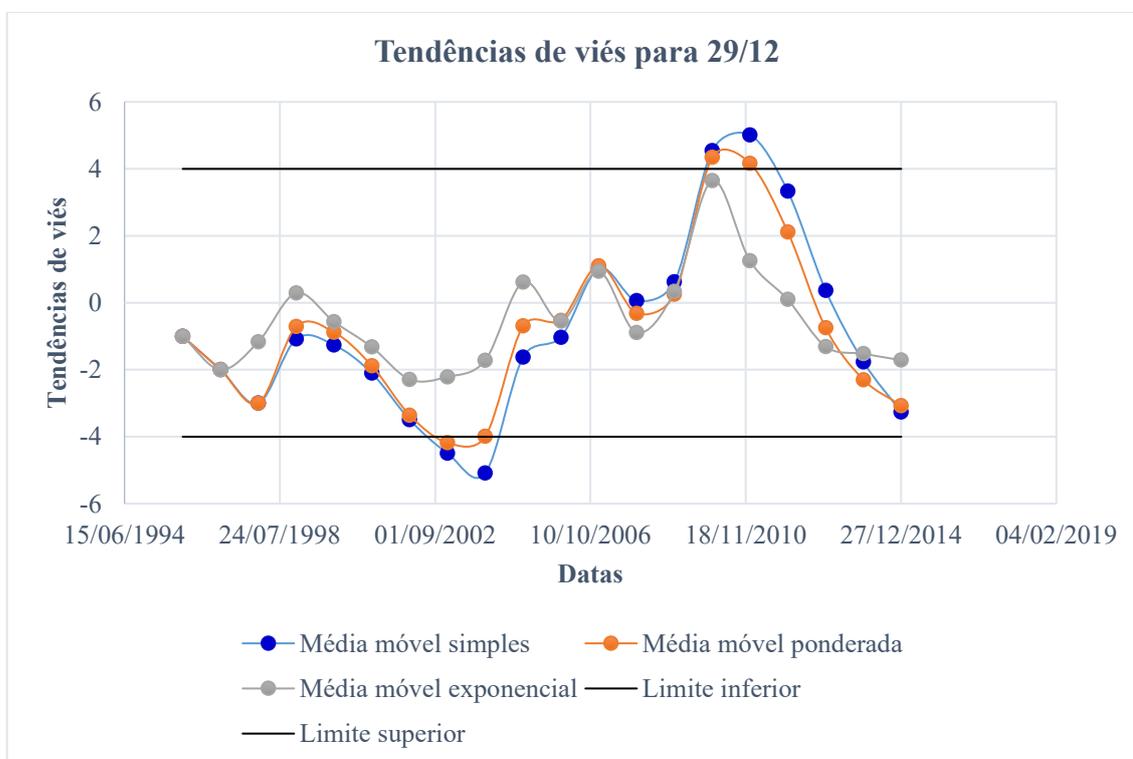
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 54 - (a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 29/12 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3167



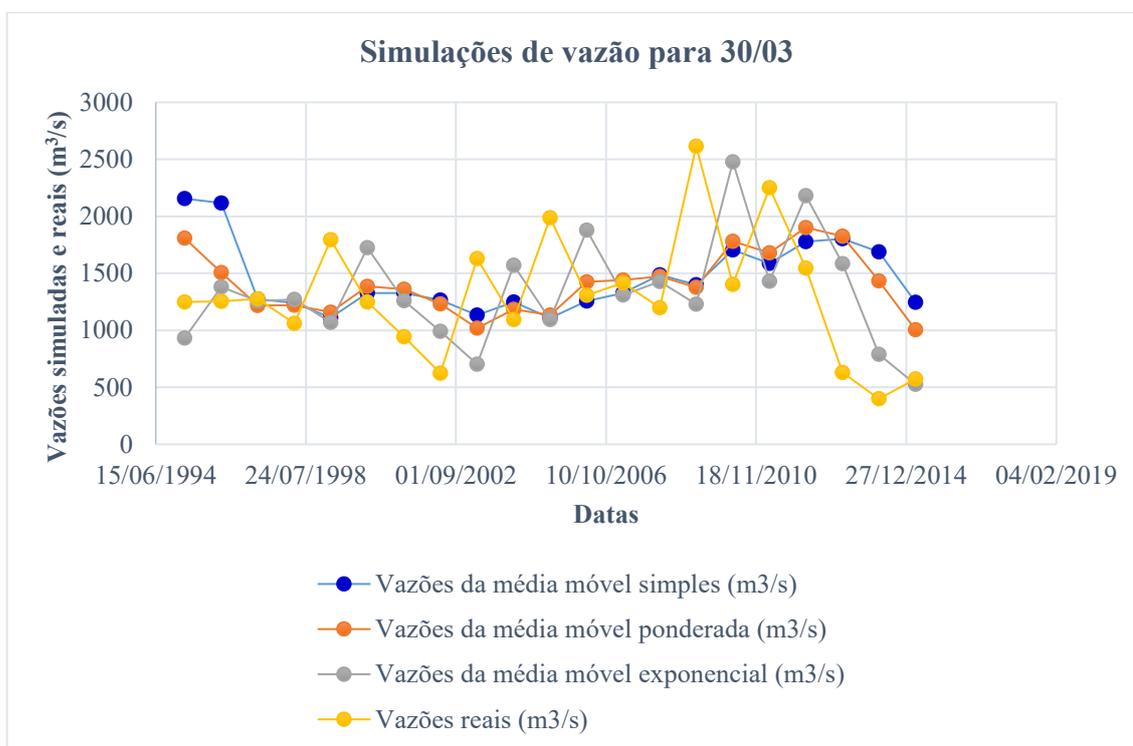
(a)



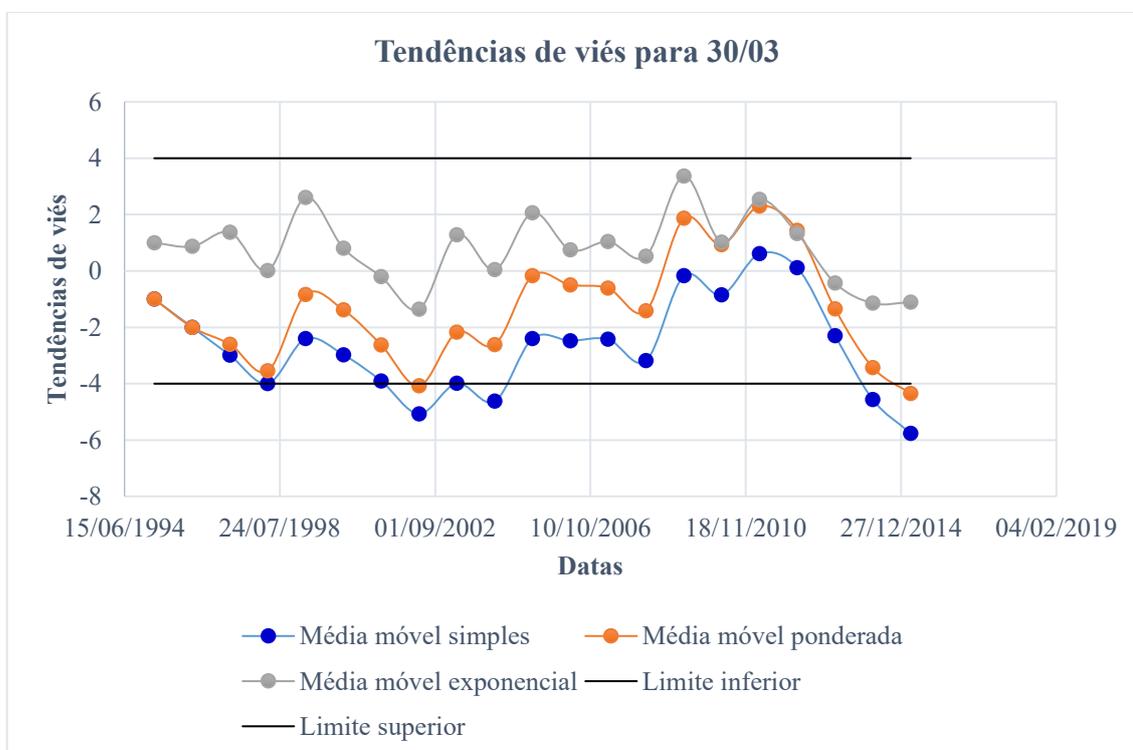
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 55 - (a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 30/03 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3167



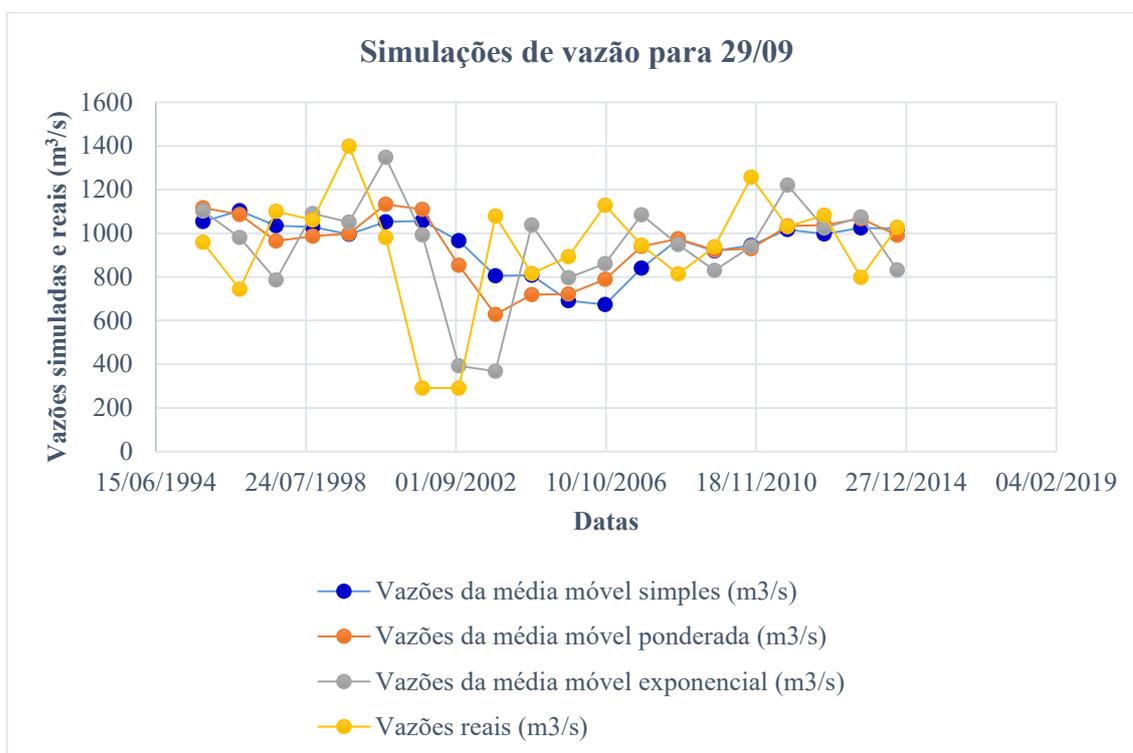
(a)



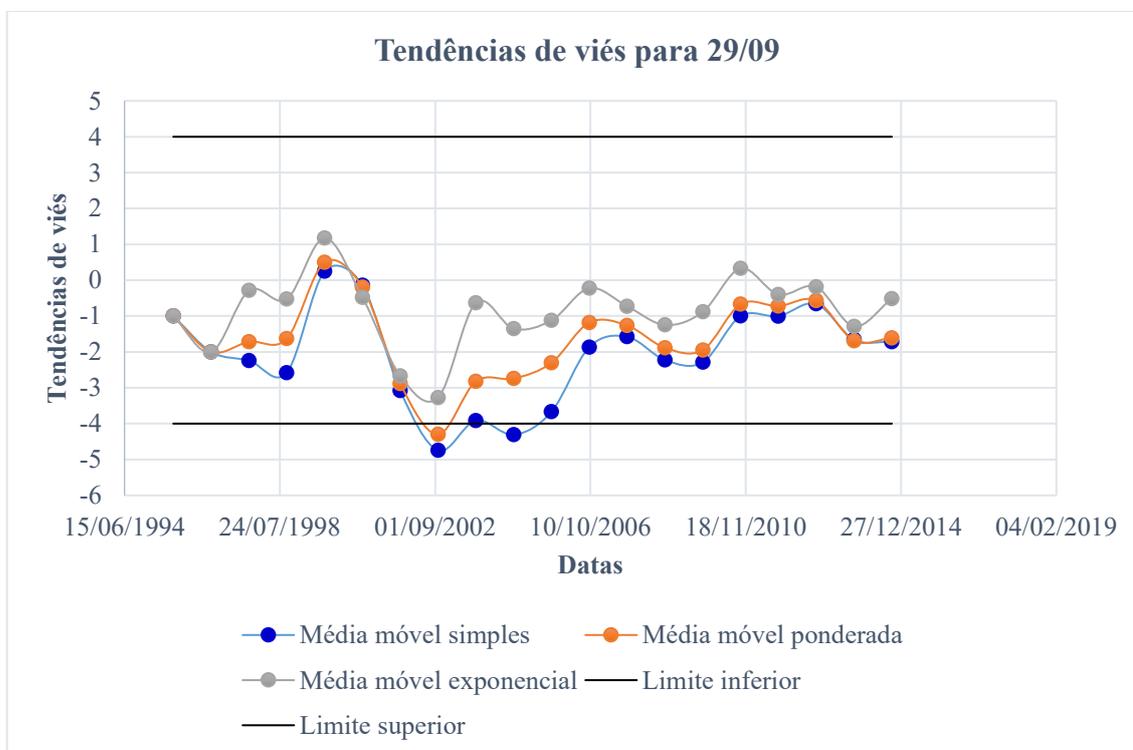
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 56 - (a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 29/09 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3182



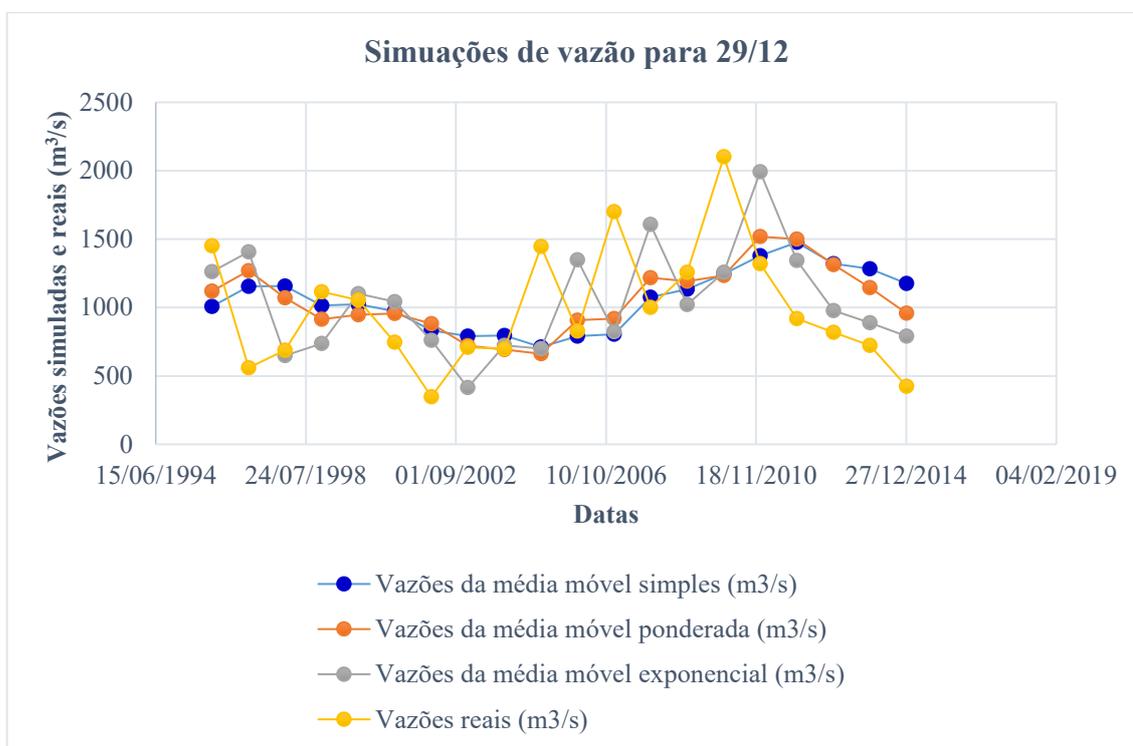
(a)



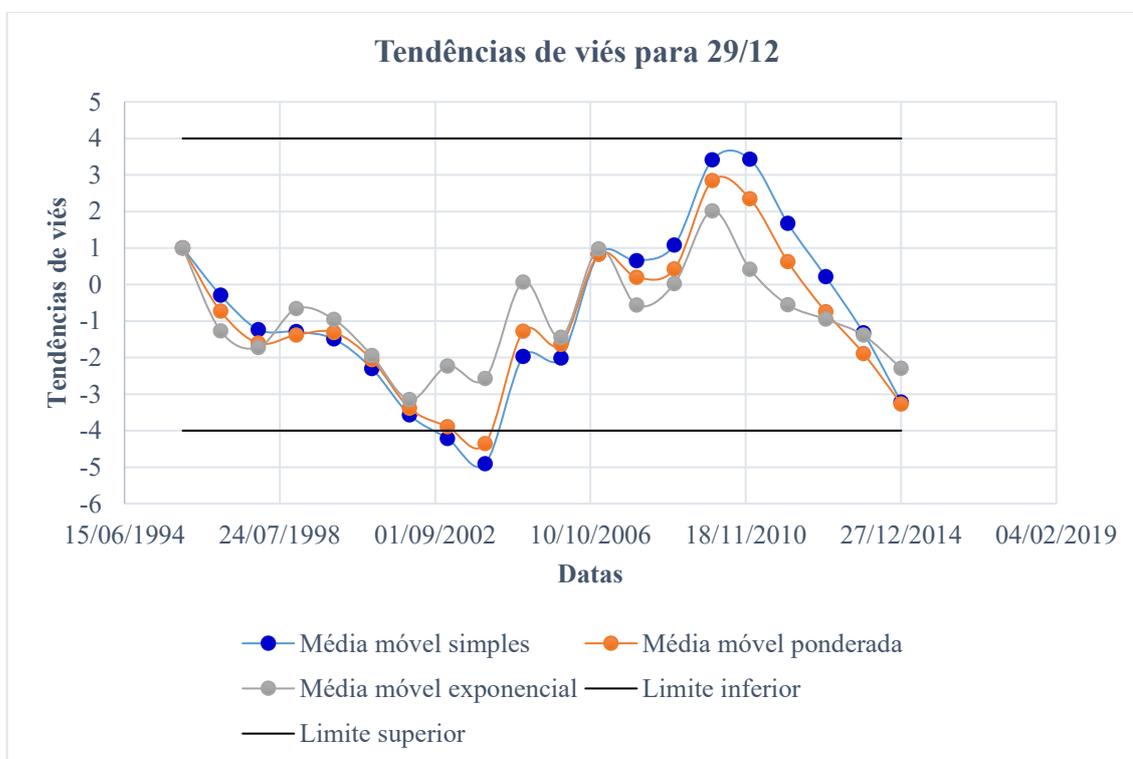
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 57 - (a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 29/12 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3182



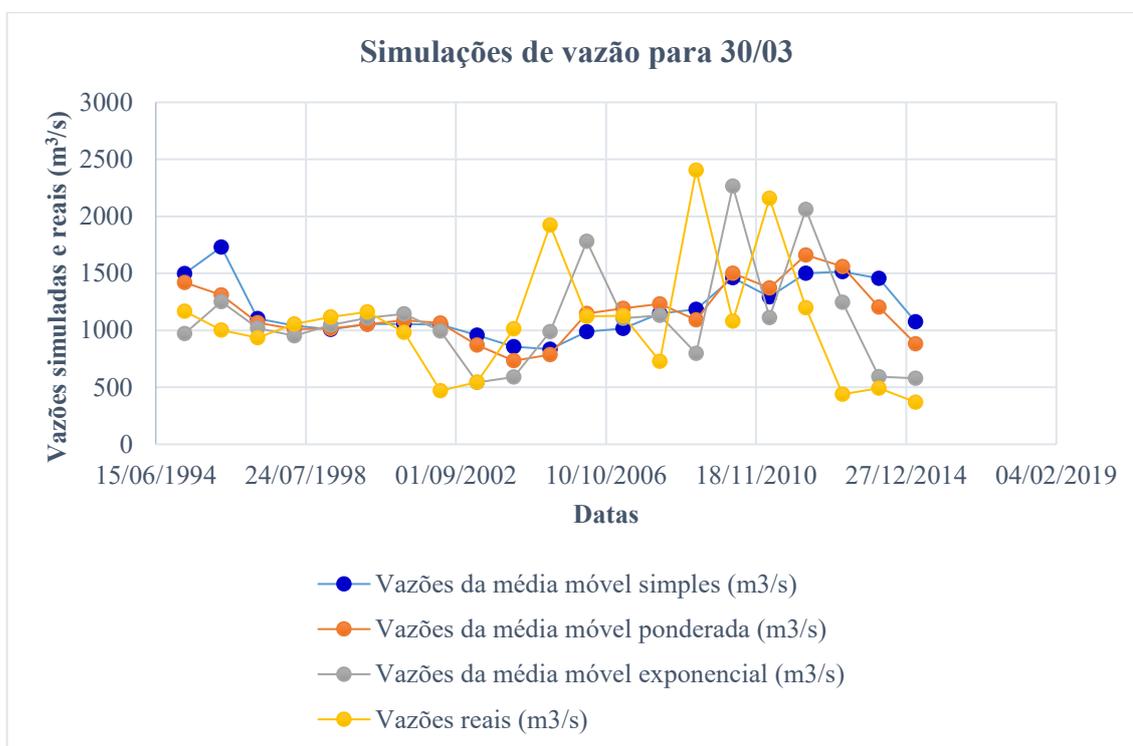
(a)



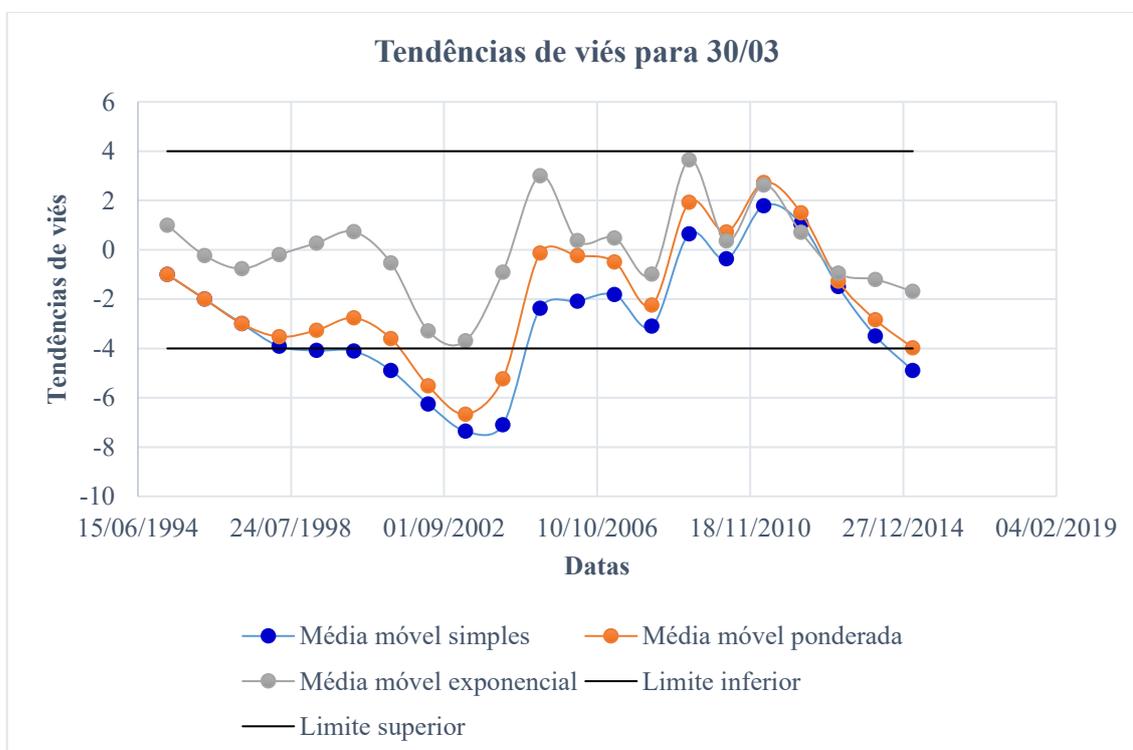
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 58 - (a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 30/03 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 3182



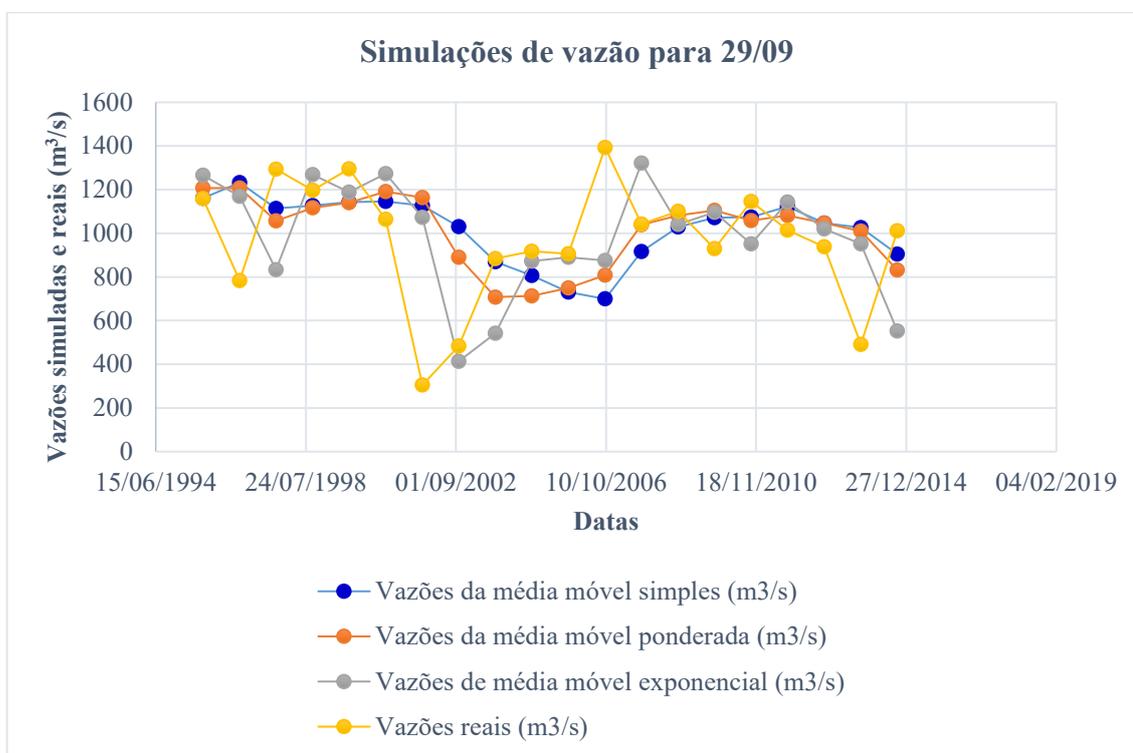
(a)



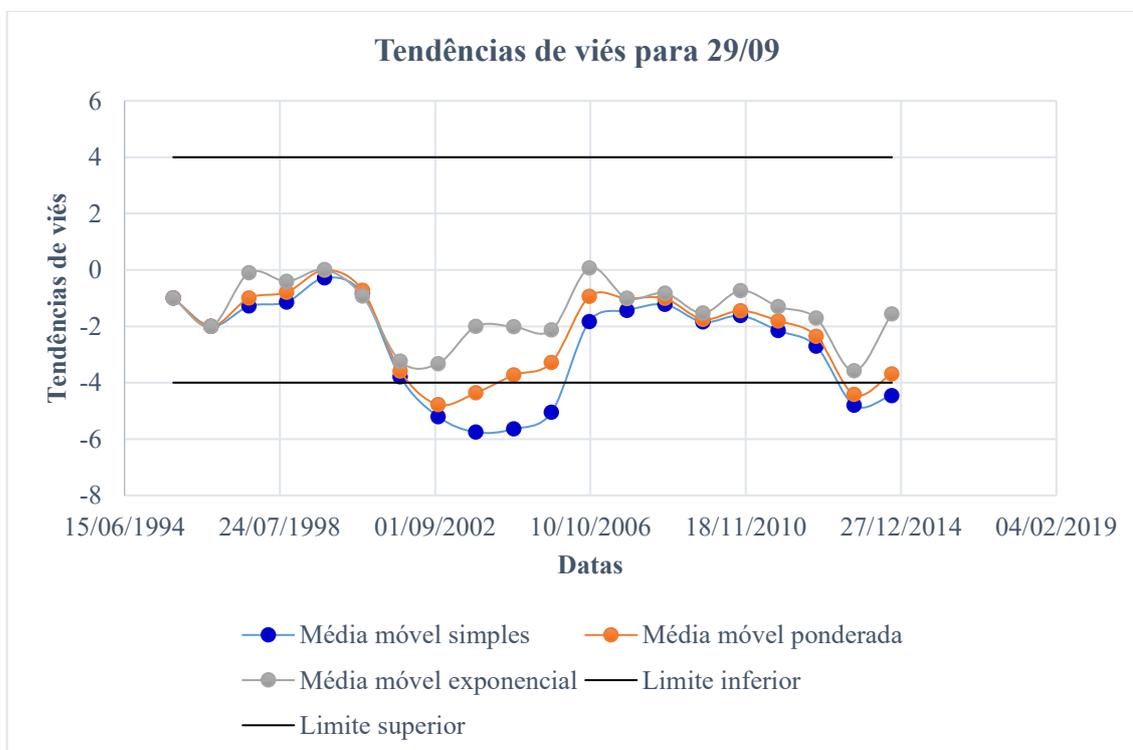
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 59 - (a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 29/09 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 2562



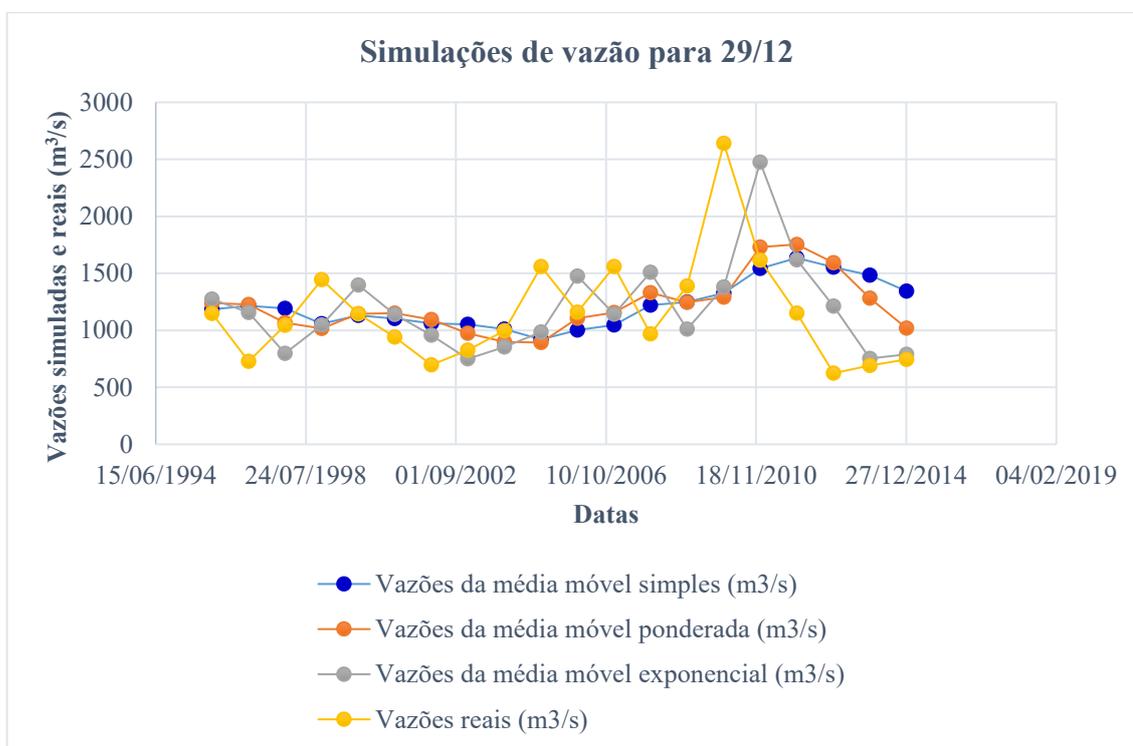
(a)



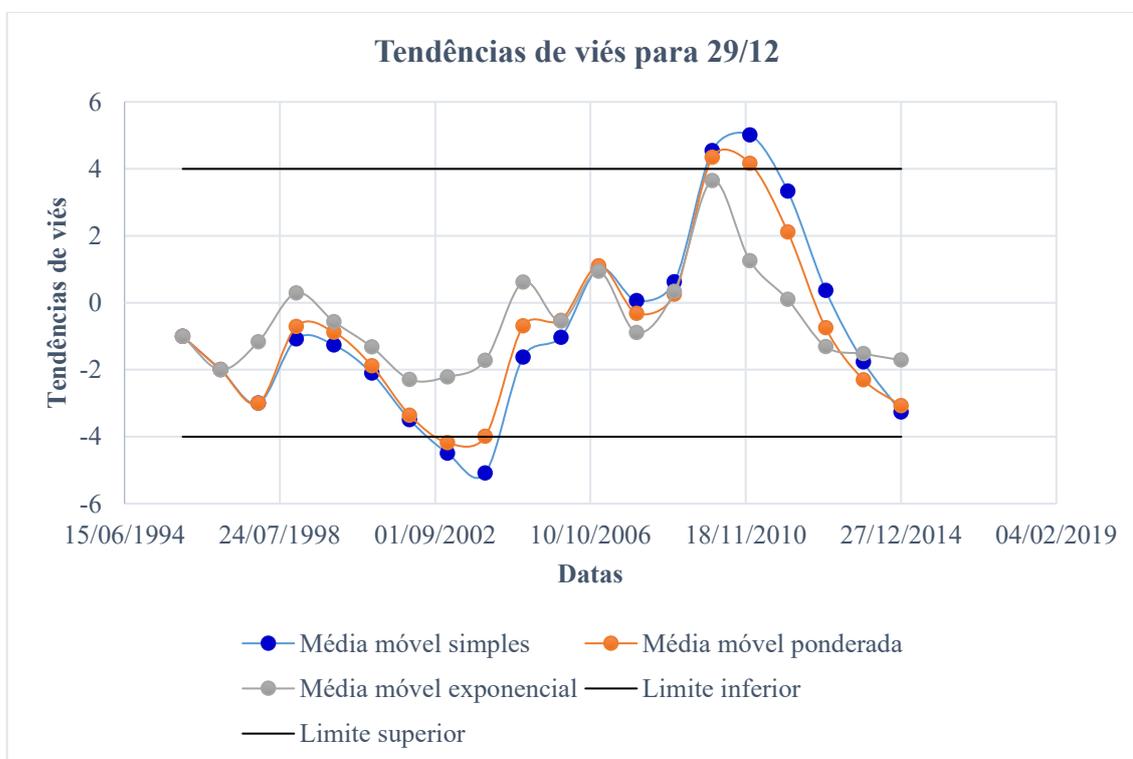
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 60 - (a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 29/12 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 2562



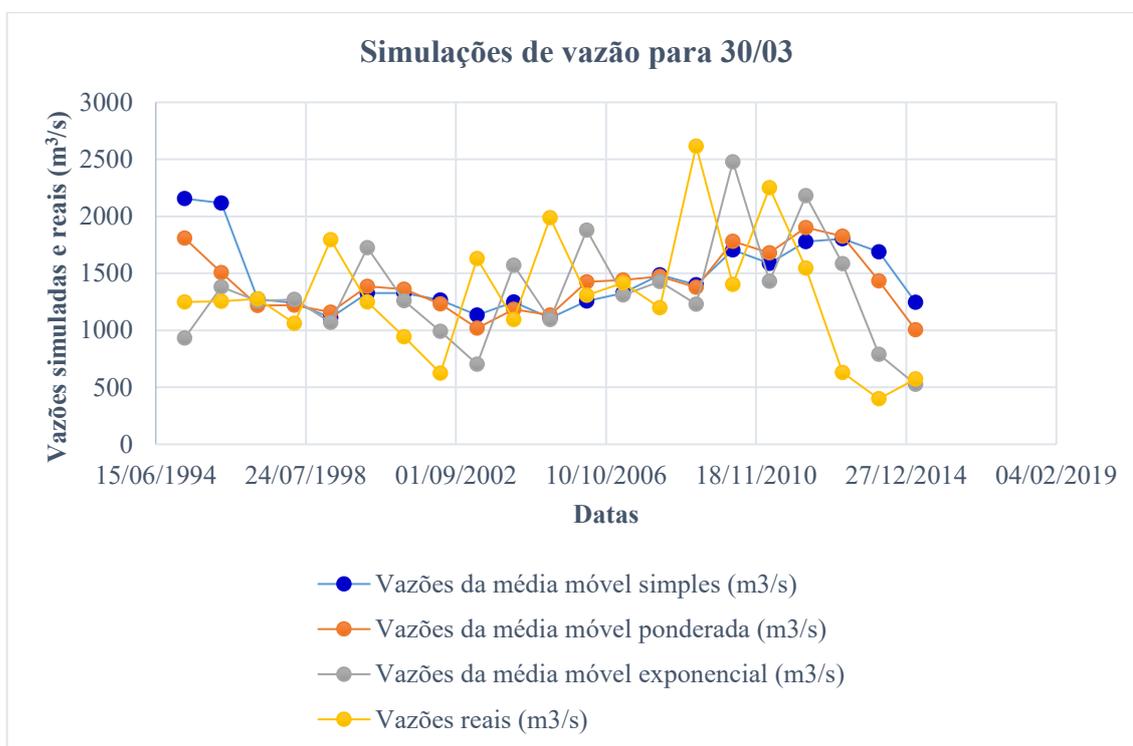
(a)



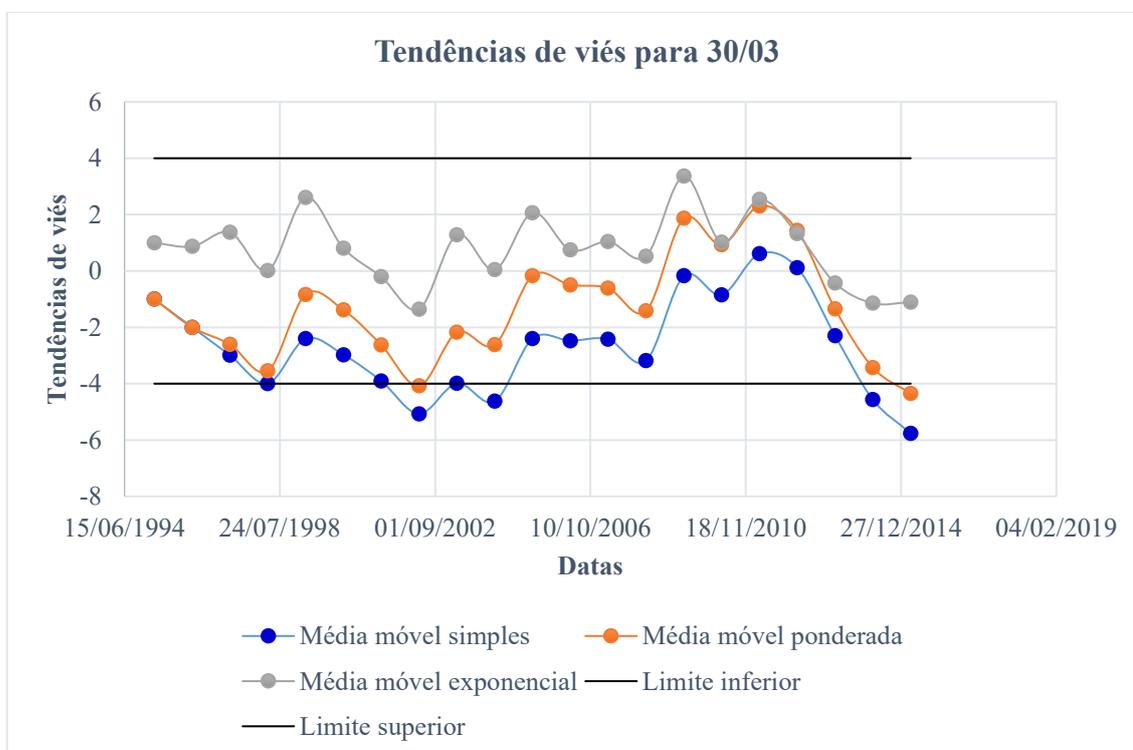
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 61 - (a) Comparativo entre vazões simuladas e observadas para 30/03 e (b) verificação das simulações segundo a tendência de viés no posto ID 2562



(a)



(b)

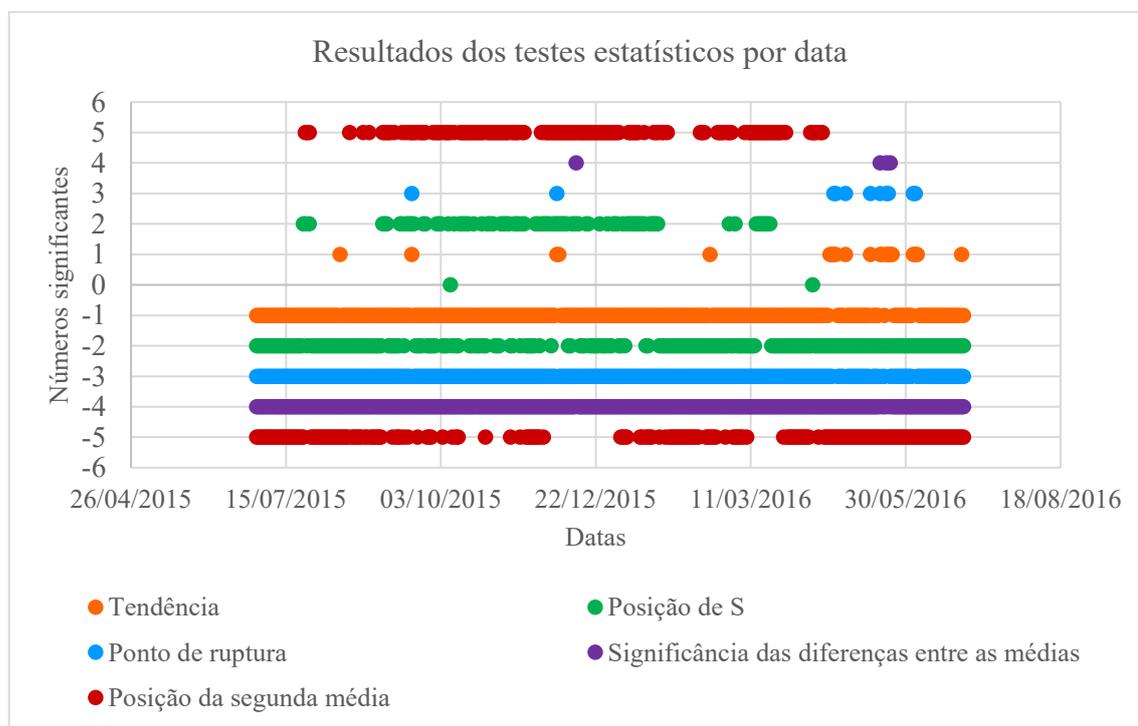
Fonte: O autor (2023).

Estes resultados indicam que o modelo MME apresenta os melhores resultados nessas 3 estações, assim como ocorre com o posto ID 3161. Não só os picos e as baixas de vazão são muito melhor refletidos na simulação de MME, ainda que com algum atraso, como na análise da tendência de viés, ao contrário dos modelos MMS e MMP, MME demonstrou respeitar os limites mínimo e máximo preconizados nas datas de 29/09, 29/12 e 30/03.

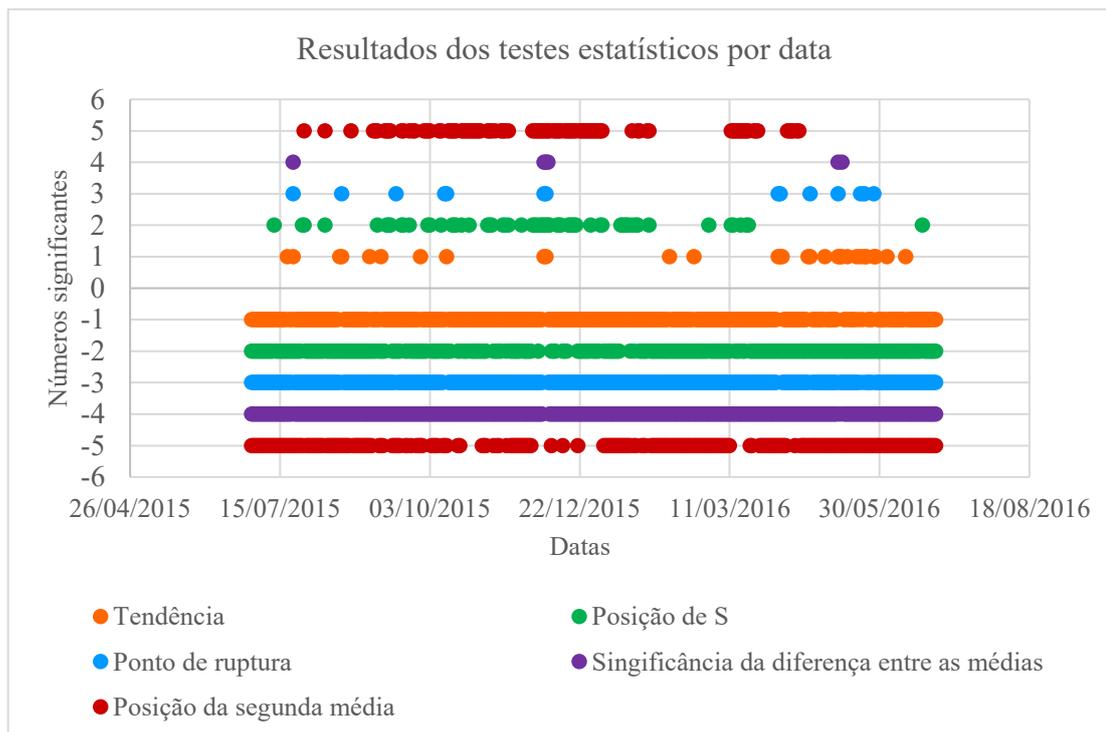
APÊNDICE D – Distribuição gráfica dos resultados dos testes estatísticos

Os gráficos 62 e 63 mostram a distribuição gráfica dos resultados dos testes estatísticos. Nas imagens, -1 significa ausência de tendência na série temporal segundo o teste de Mann-Kendall, e +1 significa a presença dessa tendência segundo o teste; -2 representa valores negativos de S no teste de Mann-Kendall, 0 representa $S=0$, e +2 representa valores positivos de S ; -3 indica que não há pontos de ruptura na série, segundo o teste de Pettit, e +3 indica que há pontos de ruptura; -4 aponta que não há diferença de grande significância entre as médias de vazões nos 2 períodos da série, de acordo com o teste t de *student*, e +4 indica que há diferença significativa entre ambas as médias; -5 mostra que a média do segundo período é menor que a média do primeiro, 0 mostra que as médias são iguais, e +5 que a média do segundo período é superior à do primeiro.

GRÁFICO 62 - Resultados dos testes estatísticos para (a) ID 3161 e (b) ID 3167



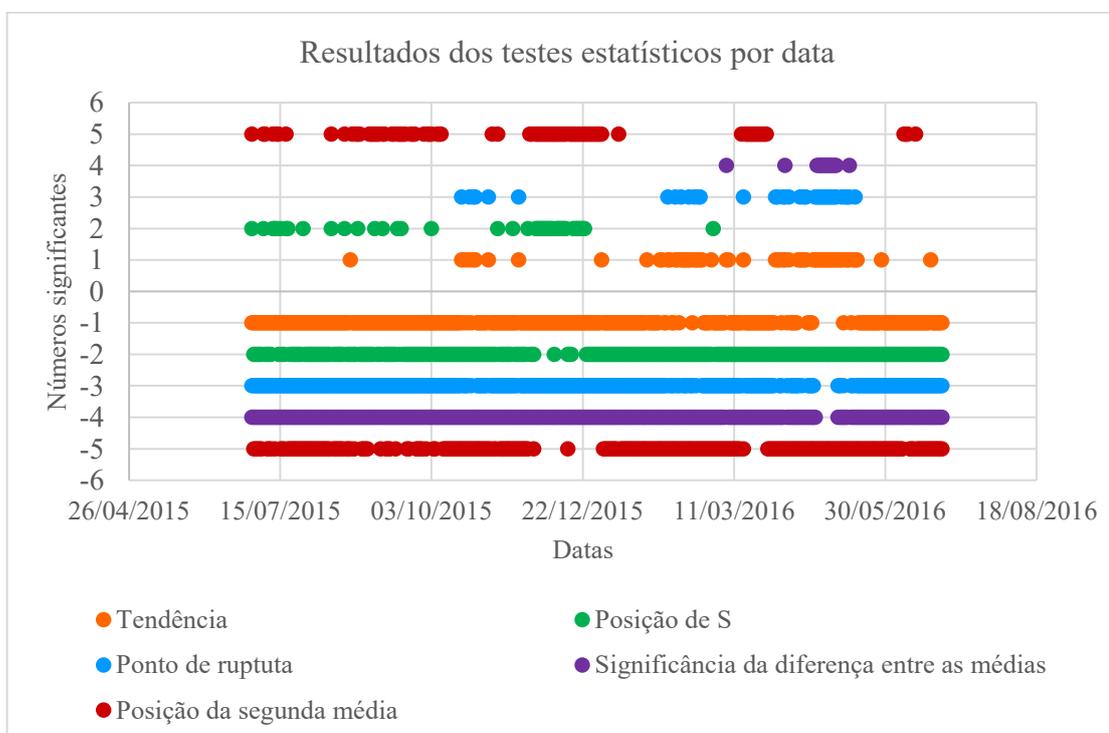
(a)



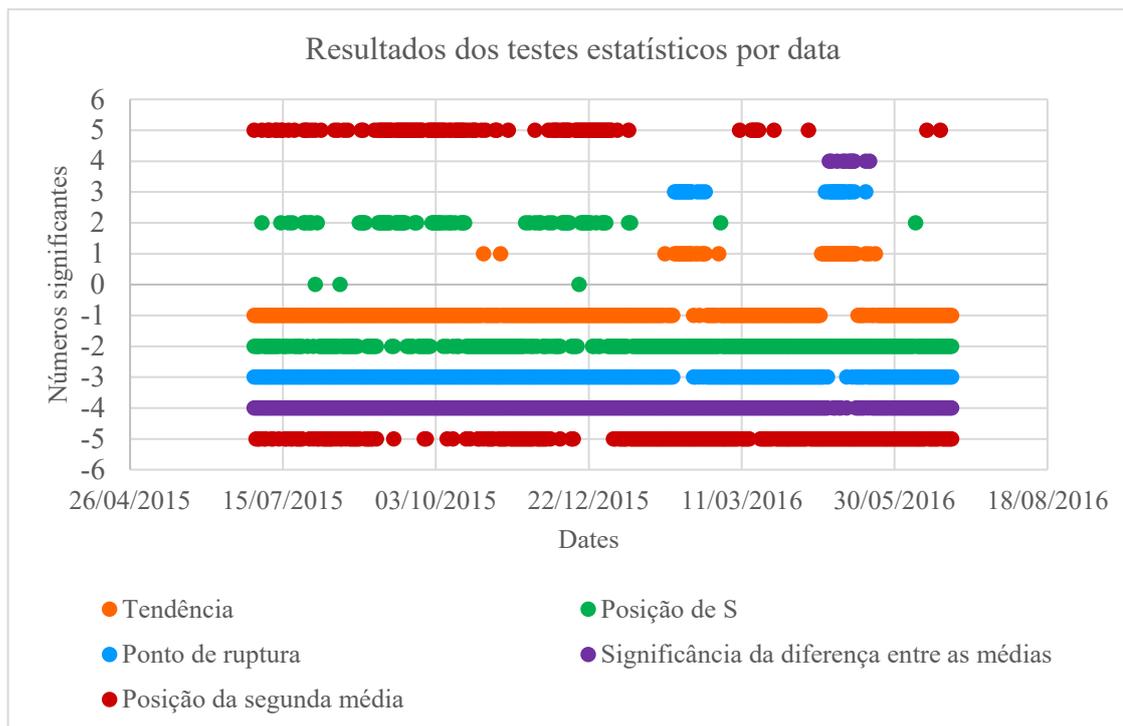
(b)

Fonte: O autor (2023).

GRÁFICO 63 - Resultados dos testes estatísticos para (a) ID 3182 e (b) ID 2562



(a)



(b)

Fonte: O autor (2023).

Evidentemente, os gráficos mostram uma quantidade muito maior de séries sem tendências, sem pontos de ruptura e sem diferenças de grande significância entre as médias dos 2 períodos de subdivisão. Isso já era previsível, dados os resultados percentuais obtidos com os testes estatísticos. O fato de grande parte das séries com tendência, *changin-point* e diferenças significativas entre as médias se concentrar no período de março a maio provavelmente se deve à utilização da água do Rio Grande para a irrigação, especialmente a partir de abril, quando se inicia o período de seca na bacia hidrográfica.

Em complemento, é interessante pontuar que maiores concentrações de séries com tendência segundo o teste de Mann-Kendall ocorrem na segunda metade do período de datas finais 30/06/2015-29/06/2016. Já para valores de $S > 0$, as maiores concentrações ocorrem na primeira metade desse mesmo período, sendo na maioria dos casos $S < 0$. Também existem mais séries com pontos de ruptura na segunda metade do período, ao passo que as maiores concentrações de diferenças significativas entre médias tendem a estar mais próximas ao fim daquele. Essas são características que se repetem em todos os postos.

A única exceção é a presença de séries com a média de vazões do segundo período como superior à média do primeiro, que exceto pelo posto ID 3161, verifica-se mais concentrada na primeira metade do intervalo de 30/06/2015-29/06/2016.